THE CAMBRIDGE ILLUSTRATED HISTORY OF ASTRONOMY

剑桥插图天文学史

〔英〕米歇尔·霍斯金 主编　江晓原 关增建 钮卫星 译



THE CAMBRIDGE ILLUSTRATED HISTORY OF ASTRONOMY

责任编辑 傅光中 特邀校对 黄昭生 装帧设计 李海峰

文笔老练，插图丰富。《剑桥插图天文学史》实为一部独一无二，纵贯古今之天文学理论与实践之集大成者。

在伊斯兰世界遥远的角落，中世纪的穆斯林们如何运用天文学计算麦加的方向？那惟一觉察到地球可能在绕日旋转的古希腊人是谁？克利斯托弗·哥伦布又是如何误用了他从一册天文学年鉴上得来的关于一次月食的知识？

奇闻轶事与迷人细节融为一体，本书描绘我们如何观天，并且解释了人类在不同历史时期观测天象之所见；这些所见又是怎样影响了人类的信仰和神话；以及伟大的天文学家为今天的天文学知识所做出的贡献。这是一部栩栩如生、高度可视的天文学史——对于专家和非专家，它都是一次兴味盎然的阅读。

- 一部史无前例的插图本世界天文学史
- 富有亲和力的文笔，对技术概念做出了清晰的解释
- 大量精美的线描插图和彩色插图，系统的大事年表、专业术语表，进一步阅读书目和完备的中文索引
- 主编及其他作者均为世界天文学史相关研究领域的权威，译者为国内天文学界实力派的中青年学者和专家



ISBN 7-80603-693-8
定价：70.00元

THE CAMBRIDGE ILLUSTRATED HISTORY OF ASTRONOMY

剑桥插图天文学史

[英] 米歇尔·霍斯金 主编　江晓原　关增建　钮卫星　译



山东画报出版社

山东省版权登记 图字：15-2001-53号

图书在版编目（C I P）数据

剑桥插图天文学史/（英）米歇尔·霍斯金主编；
江晓原等译.-济南：山东画报出版社，2003.3
ISBN 7-80603-693-8

Ⅰ.剑… Ⅱ.①霍… ②江… Ⅲ.天文学史—普及读物 Ⅳ.P1-09

中国版本图书馆CIP数据核字（2002）第088908号

The Cambridge Illustrated History of Astronomy
Edited by Michael Hoskin

本书根据剑桥大学出版社1997年第1版译出
本书中文版简体字版权经由上海市版权代理公司帮助获得

扉页前一页的图片：雷纪奥蒙塔努斯(Regiomontanus)用星盘进行观测

扉页图片：天鹅座的反射星云(由附近恒星所照亮的气体云)和暗星云(尘埃云)

扉页右图：
约翰内斯·海维留斯(Johannes Hevelius)和他的妻子伊丽莎白正在用纪限仪(仪器为圆周的1/6，用以直接测量两个天体之间的角距离)进行观测

书　　名 剑桥插图天文学史
主　　编 〔英〕米歇尔·霍斯金
译　　者 江晓原、关增建、钮卫星
出版发行 山东画报出版社
社　址 济南市经七路胜利大街39号 邮编 250001
电　话 总编室 (0531)2060055-5420
市场部 (0531)2053182 (传真) 2906847
网　址 http://www.sd-pictorial.com.cn
http://www.sdhbs.com.cn
电子信箱 hbcb@sdpress.com.cn
印　　刷 山东新华印刷厂临沂厂
版　　次 2003年3月第1版
印　　次 2003年3月第1次印刷
规　　格 16开（889×1194毫米）
24.25印张 306幅图 320千字
印　　数 1—5000
定　　价 70.00元

如有印装质量问题，请与出版社资料室联系调换。



撰稿人：

米歇尔·霍斯金（Michael Hoskin） 剑桥丘吉尔学院研究员。为剑桥研究生讲授天文学史30年，现已提前退休。在此期间他曾担任科学史系主任。1970年他创办了《天文学史》（Journal for the History of Astronomy）杂志并任主编。他还是剑桥大学出版社多卷本《天文学通史》（General History of Astronomy）的总主编，此书是国际天文学联合会（International Astronomical Union）以及国际科学史与科学哲学联合会（International Union for the History and Philosophy of Science）共同赞助的。

J.A.班奈特（Bennett） 牛津大学科学史博物馆负责人，利纳克尔学院①研究员。他也是在剑桥的惠普尔（Whipple）科学史博物馆前馆长。他的著作包括《克利斯多弗·雷恩的数理科学》（The Mathematical Science of Christopher Wren）和《分裂之环》（The Divided Circle）。

古克礼（Christopher Cullen） 伦敦大学东方和非洲学院历史系中国科学史与医学史高级讲师，剑桥李约瑟研究所出版委员会主席。他是《中国早期的天文学和数学——〈周髀算经〉》一书的作者。

大卫·德惠斯特（David Dewhirst） 剑桥圣体节学院研究员。最近从剑桥大学天文学研究所的天文学家兼图书馆员任上退休。

欧文·金格利希（Owen Gingerich） 马萨诸塞州剑桥之哈佛—史密森尼天体物理中心的天文学及科学史教授。他是剑桥大学出版社《天文学通史》的编辑委员会主席。他的兴趣涉及广泛的历史范畴，但最致力于哥白尼革命的研究。他已经出版了两部文集：《伟大的哥白尼寻踪》（The Great Copernicus Chase）和《天眼——托勒密、哥白尼、开普勒》（The Eye of Heaven: Ptolemy, Copernicus, Kepler）。

克立弗·拉各斯（Clive Ruggles） 莱斯特大学从事考古学研究的高级讲师，《天文学史》杂志考古天文学增刊编辑。他独立撰写、编辑或与他人合作编辑了许多书籍，其中包括《公元前4000～前1500年间不列颠的天文学与社会》（Astronomy and Society in Britain during the period 4000–1500 BC）、《巨石天文学》（Megalithic Astronomy）、《巨石的记录》（Records in Stone）、《20世纪90年代之考古天文学》（Archaeoastronomy in the 1990s）、《天文学与文化》（Astronomies and Cultures）和《不列颠及爱尔兰之史前天文学》（Astronomy in Prehistoric Britain and Ireland）。

① Thomas Linacre，英王亨利八世之御医、伦敦皇家内科医师学会创立者。——译者注

中文译者：

江晓原　上海交通大学教授，博士生导师，科学史系系主任。科学史博士。曾在中国科学院上海天文台工作15年，长期领导中国惟一的专职天文学史研究组。已出版《天学真原》、《天学外史》、《回天——武王伐纣与天文历史年代学》、《历史上的星占学》、《江晓原自选集》、《天文西学东渐集》、《东边日出西边雨》等专著、论文集、随笔集、译著等共20种。

关增建　上海交通大学科学史系教授，博士生导师，科学史博士。已出版《中国古代物理思想探索》、《计量史话》、《中国古代科学技术史纲·理化卷》等著作。

钮卫星　上海交通大学科学史系副教授，科学史博士。与江晓原合作出版了《回天——武王伐纣与天文历史年代学》、《天学志》、《天人之际》等著作。

杨泽忠　上海交通大学科学史系在读博士研究生。

原书主编为中文版所作序言

我有幸在剑桥大学度过我的学术生涯，我的亲密朋友之一就是已故的李约瑟博士，他的不朽巨著《中国的科学和文明》(即《中国科学技术史》——译者注）向西方揭示了，中国人在科学的一般方面、特别是在天文学方面所做出的贡献。如今他的巨著将长存在剑桥的李约瑟研究所。

当我得知，我自己关于西方天文学发展历史的书将被译成中文，介绍给中国读者，这在我实为乐事。这将促进中国与西方公众之间的相互理解和交流。我感激山东画报出版社和江晓原教授，使这一切成为可能。

米歇尔·霍斯金

2001年2月19日

译者说明

本书是一部富有权威性的天文学史著作。因为主编及各章撰稿人，皆为在各自研究领域内享有崇高声誉的杰出研究者。在我二十年的天文学史研究生涯中，我与他们或有幸结识，或有过间接的学术交道，至少对他们也是“久闻大名”。这一点，成为我和我的同事们“毅然”下决心接受此书翻译任务的重要原因之一。

在此书中译本出版之前，对于中国读者来说，始终缺乏一部权威的、综合性的天文学史。虽然也有学人做过初步的尝试，但是与两部同名的《中国天文学史》相比，其规模、水准和成就皆不能同日而语。翻译进来的西人著作中，有过两部小型的天文学史，但其权威性有限，写作方式又很老旧，无法满足当代读者的阅读趣味，故亦不能与本书等量齐观。

在数十年间，我所知道的不少中国读者，倒是经常在1965~1966年间由科学出版社出版的三册《大众天文学》（法国人C．Flammarion著，李珩译）中，寻找到一些他们所需要的西方天文学史的知识。

如今此书中译本的出版，将一举改变上述的局面。

对于广大受过中等以上教育的公众来说，本书是一部篇幅适中、图文并茂、内容又极为引人入胜的读物，尽管有的人未必能理解其中所有技术性的细节——为了帮助读者尽量做到这一点，我们已经在译文中加入了大量译注——但是仍然能够获得对天文学史的一个全面的了解。

而对于有一定专业水准的读者，比如研读天文学史专业的研究生，本书则是一本非常适用的专业入门书。

即使是对于专业程度更高的学者——比如天文学史教授——来说，通过本书看一看著名的国际同行们在处理这一课题时是如何论述、如何取舍的，仍然具有相当高的学术参考价值。

本书的翻译是四人通力合作的结果，具体分工如下：

前言及封面、勒口等说明：江晓原译

第一、二、三章：江晓原译

第四、五章：杨泽忠译，江晓原校

第六、七章：关增建译

第八、九章：钮卫星译

大事年表：钮卫星译

专业术语表、索引：关增建译，钮卫星、江晓原校

江晓原对全书译稿做了修改和润色，并加了全部的译者注。

前面曾说“毅然”，并非故作惊人之语。谁都知道，翻译是为人作嫁衣裳，往往吃力不讨好，况且我和同事们都苦于繁重的学术任务，翻译经验也不丰富。但是考虑到此书的价值，我们还是决定为人作嫁一回。

江晓原

2002年7月18日于上海交通大学科学史系

前言

大学教师们相信教学相长。贯穿本书的思路，就是笔者三十年来在向剑桥大学研究生讲授过程中所学得的天文学史。

所有的教师最终都确信，自己能够既观全局又见重点。我也未能免俗，所以我选择了对那些我相信具有根本性或重要性的问题做详细的、有时甚至是非常详细的讨论。为了节省篇幅，在一些别的历史学家也许认为是重要的问题以及大量更次要的话题方面，我都只是顺便提到。

我们将注意力集中在近东和欧洲天文学——最终成为今日全球共同的天文科学——的发展。其他的传统，比如中国的天文学，以及西班牙征服者到达之前在新大陆发展起来的相当成熟的天文学（指玛雅天文学——译者注），当然吸引着一些天文学史家的注意力，但在本书中它们仅被简要地描述。

读者在进入天文学的历史时，往往会期望对“谁有优先权”进行讨论，但在本书中，此种期望将只能得到非常有限的满足。这有两个原因：

首先，“优先权”假定了科学是一种从不间断、一直向前的真理积累，理论则不断地趋向并接近真实。在事实的层面上，情况可能是这样。比如我们很难想象有一天我们会发现金星比水星更接近太阳。但是更深一层，在理论的层面上，科学的发展有着无限的复杂性。被称为“正规科学”的，经常包含着从最初的困惑到逐渐简洁精致的过程，包含着来自多方面的贡献。有时候会有戏剧性的或令人困扰的进展。牛顿去世之后一个世纪，人们普遍相信他和整个人类一起享有了宣布物质宇宙基本真理的特权——这种宣布已经在1687年进行过一次（指牛顿《自然哲学的数学原理》一书在这年出版——译者注），这样的壮举不可能再重复。但是爱因斯坦通过对牛顿关于空间、时间、重力等等最基本概念的彻底重构，摧毁了这个令人满意的看法。然而，如果谁宣称牛顿干脆就是“错了”而牛顿的工作也不值得再加以注意了，那他就是一个非常糟糕的历史学家了。

其次，今天的天文学史家知道，他们的任务，不是去给以往天文学家中那些观点与现代同行相吻合的人授勋，而是要将他们的读者带上一段激动人心的旅程。这段旅程将引导读者前往从概念上来说是有异国情调的地方——到过去的文明之中，寻求对天空意义的理解，问经常与我们今天习以为常的方式很不相同的问题，问题的答案，按照我们今天的思维方式也是怪异的。历史学家邀请读者同他们一起进入奇异的概念中探险，而将关于自然和天文学目的的现代假设置之脑后，还要将许多现代天文学知识暂置于“靠边等待”的位置。

例如，柏拉图的同时代人观测到，天球夜复一夜以匀速旋转。在天球上有无数“固定”的恒星，它们随着天球旋转却不改变它们相互之间的相对位置；但是他们也看到，有七个“流浪者”或“行星”，以令人迷惑的方式穿行于众多恒星之中：太阳、月亮、水星……等等。如果我们想理解从柏拉图到哥白尼之间19个世纪中的天文学，我们必须把现代的“行星”概念放到一边，而接受太阳和月亮进入“行星”行列。更重要的是，我们必须把现今对天文学家工作任务的认识放到

一边，因为我们是在研究另外的文化，在那种文化中，天文学家的任务是，为每个"行星"设计一个几何模型，根据该模型可以计算出该天体未来时刻精确的位置表。

这意味着，将近两千年间，天文学是应用几何学的。幸运的是，没有数学训练的读者不必绝望，这里只涉及初等概念——几乎就是单一或成对的匀速圆周运动。至于这些几何模型本身，以球状的圆周组合构成，就远不是初等的了，但我们将仅限于提供个案，而且即使是这些个案，也将独立于正文的讨论之外。

没有人能够将牛顿后继者们所使用的数学技巧说成是初等的。在《原理》(Principia)中，牛顿主张，万有引力定律是理解物质宇宙的关键。对万有引力定律的考验，是将其应用于有惊人复杂性的太阳系时，能否推算出我们所观测到的行星及其卫星和彗星的运动。有一个多世纪，这一问题占据了当时一小群天才数学家的注意力，而如何正确评价他们的工作，是天文学史家所面临的一个问题。尽管他们的结论引起了天文学家最热切的兴趣，但是他们自己并不是天文学家，而只是数学家在为天文学服务，因此我们即使忽略他们结论中的细节，也不致有良心上的不安。

这些"天体数学家"和他们古代及中世纪的前辈一样，全神贯注于太阳系。恒星还只是行星运动的几乎不变——因而也引不起人们什么兴趣——的背景，除了在星表中标定它们的位置和亮度，对于恒星还没有什么事情可做。甚至晚到1833年，恒星和星云方面的头号权威约翰·赫歇尔(John Herschel)，出版的专著《天文学》(A Treatise on Astronomy)中，还仅仅用了一章来处理恒星的问题。他的同时代人，无论是专业的还是业余的，除了极少例外，都只对一颗恒星——就是太阳——及其卫星感兴趣。

但是从那以后天平就明显地向另一边倾斜了，今天的历史学家看到，18、19世纪研究恒星、星云和宇宙结构的先驱，对未来的天文学思想有深远影响。因此本书在越出太阳系边界之外的早期探索上花费了更多的笔墨，对那个时代天文学家的活动来说也是合适的。

有一个主题重新贯穿在20世纪对天文学的评价之中：距离。观测者看到天体好像在天球表面散布开来，这个证据是二维的。而为了从理论上推测三维宇宙，观测者必须研究包含距离的三维坐标系。

关于这一研究的故事是激动人心的，测量难以想象的遥远物体的距离，是天文学的惊人成就之一，因为即使是离我们最近的恒星，它们发出的光线也要经过几年才能到达地球。但天体这遥远的距离，却给我们带来意外的收获，因为我们所看到的光线，不是恒星此刻发出的光线，而是经过了多年空间旅行之后的光线。这使天文学家得以看到——几乎是不可能的——"时光倒流"的景象。距离我们越远的天体，"时光倒流"也就越远；今天这些被研究的"距离"有时是如此的重要，以致所涉及的对象被引为支持或反对宇宙学理论中关于宇宙在早期如何出现

的证据。

历史何时结束？科学何时开始？历史学家们自己，由于太接近他们当时的天文学而难以对此提供一个深思熟虑的远景。尽管用历史眼光来看待“今日天文学”为时过早，但是天文学在最近的几十年中已经有了明显的巨大的改变，这些变化太富戏剧性，太激动人心，以至于历史学家干脆不去管它们了。然而，我们的历史之旅，则一直延伸到我们今日的求索，这种求索贯穿古今，是我们与祖先共同的：去理解我们从中发现自身的那个宇宙。

米歇尔·霍斯金

于剑桥

本书编者感谢四位同事，他们慷慨担任了《剑桥插图天文学史》的顾问：
J.A.班奈特（牛津大学科学史博物馆）；
欧文·金格利希（哈佛—史密森尼天体物理中心）；
西蒙·弥顿（Simon Mitton，剑桥圣埃德蒙学院）；
柯蒂斯·威尔逊（Curtis Wilson，马里兰安纳波利斯圣约翰学院）。
还要感谢大卫·金（David A.King，法兰克福之约翰·沃尔夫冈·歌德大学）和奈尔·斯韦德罗（Neol M.Swerdlow，芝加哥大学）的帮助。
在图片方面的协助，则要感谢：
欧文·金格利希；
剑桥大学天文研究所图书馆（包括剑桥天文台的档案）；
皇家天文学会图书馆（图书管理员P.D.Hingley先生）；
牛津大学科学史图书馆；
剑桥大学惠普尔科学史图书馆。

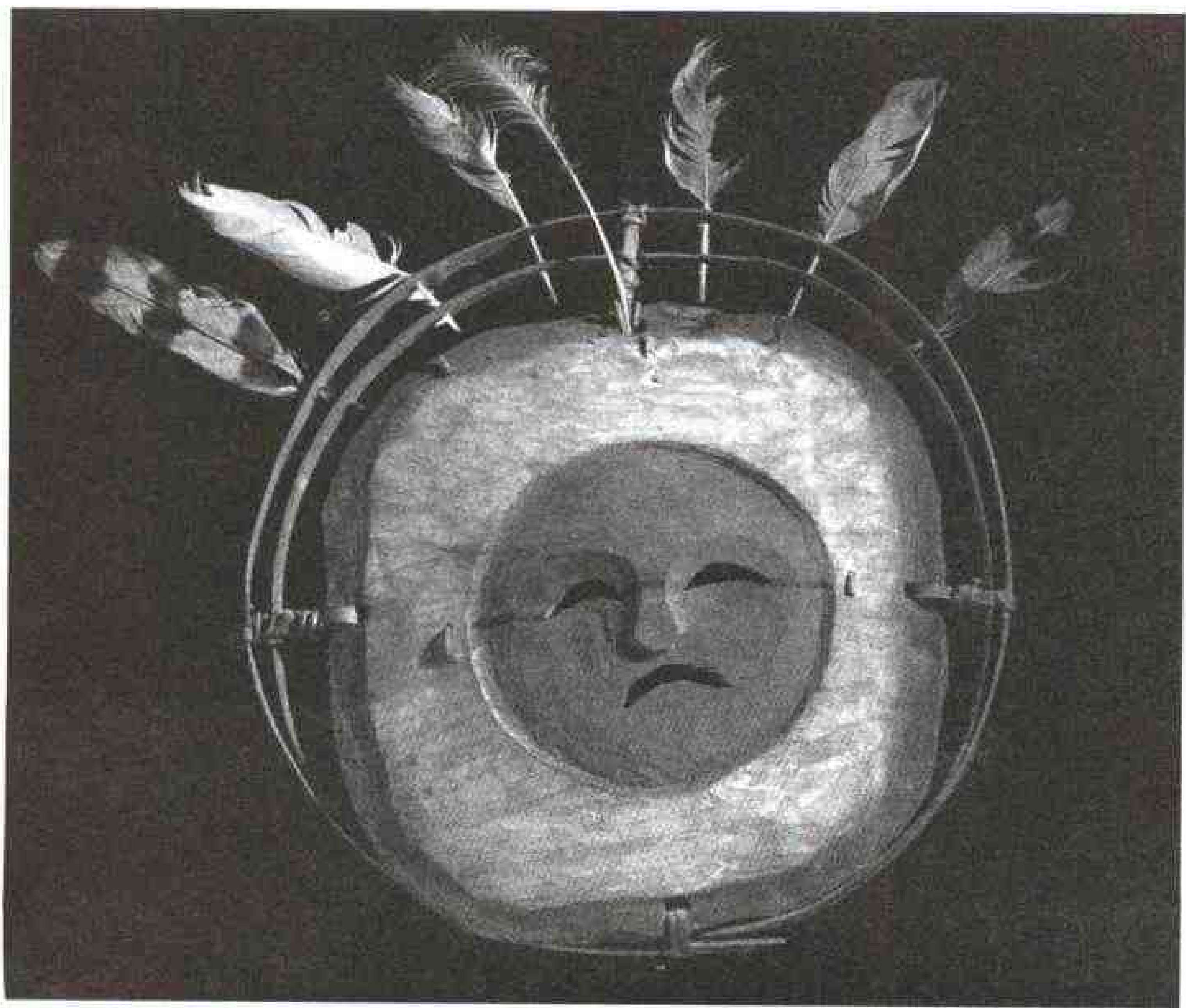
（江晓原译）

目 录

第一章 史前天文学

大部分天文学史家将时间花在图书馆和档案室里去阅读文献和书籍。有些人则投身于那些在博物馆和旧日天文台所发现的设备——星盘、望远镜等等——的研究。但是在书写或观测仪器的构造被发明之前很久，天空就已经是世界各地人群的一个文化资源。航海者依靠星星来航行；农业团体借助于恒星来帮助确定何时播种他们的农作物；意识形态体系将天体与客体、事件以及尘世和神圣世界的活动周期联系起来；我们也不能排除这样的可能性：某些史前或原始居民获得了天文学方面真正的科学启示，使他们能够——举例来说——预报日月交食。

这里，我们将把注意力集中在今天所知的天文学是如何出现的这个问题上。历史记录表明，天文学的进步出现于近东，但更显著地出现于欧洲。因为我们太容易落入在考古遗址之上强化西方思维模式和偏见的陷阱了，所以我们可以从这样的问题开始：史前欧洲人如何看待天空？是否存在什么天文启示的证据？通过比较的方式我们也看到，另有两个族群的人是用西方观念从未接触过的方式来看待天空的：一是西班牙征服之前居住在美洲的居民；一是在与其他人相对隔绝状态中保持他们传统生活方式的人群。



伊努伊特人（北美特别是加拿大北冰洋地区和格陵兰岛的爱斯基摩人）的月亮精灵。围绕着脸面具的木板表示空气、外面的环表示宇宙级别，羽毛表示恒星。北极圈因纽特人的传说中，为通常太阳统治地位的普遍观念提供了一个有趣的变例，因为伊努伊特人居住在如此遥远的极北之地，月亮在许多方面对他们来说更为重要。在北极圈的夏天，几乎没有黑夜，而在漫长的冬季，又几乎没有白昼。行星和恒星很少被关注——它们经常因为阳光、月光和恶劣天气而无法被看见，太阳经常缺席，是月亮在漫长的冬季为因纽特人提供光亮，这是他们的宇宙学中最突出的一点。

天象在两个读史前和原始天文学的学生兴趣最集中的区域——欧洲西北部和美洲热带——是大不相同的。在热带，太阳和其它天体的升降几乎是垂直的，对居住在那里的居民来说，一年中太阳直接过天顶的两个时刻总是有着特殊意义。而在欧洲高纬度地区，天体则沿着倾斜的轨道升降，在南方上中天。[①]夏至这一天时白昼最长，但此后日出和日落的方位持续向南移动，白昼越来越短，天气则越来越冷：这看起来像是一个灾祸的模式，除非太阳能够被说服重新回到原来的轨道上。现代的“德鲁伊特”[②]们在巨石阵中寻找到了夏至日日出方位的巨石标志，这一标志的对面则指向冬至日日落的方向，这些方向对于巨石阵的建造者来说也许具有有力的象征意义。

作为史前欧洲人文化资源的天空

生活在今天的欧洲人，很喜欢他们与曾占据这块土地的史前人类的哪怕是极为微弱的联系。但是某些联系确实存在。与爱尔兰米斯郡新格兰奇的巨型通道墓联系在一起的传奇，描述了全能的达戈达神（或其子）与这一历史遗迹；达戈达神的巨锅是天空的穹顶，而现代的发现（见本书第7页）是，冬日日落时阳光射进古墓最深远处，可能指示着这巨石传奇的一个被遗忘了许久的版本。而且有证据表明，在青铜时代的不列颠使用过一种历法，是根据两分两至日（春分、秋分、冬至、夏至）将一年划分为四个部分，每个部分再一分为四，这样一年就有16个“月”，每“月”22-24天。这可能是一种一年八分法的痕迹，一直留存至塞尔特人时代，由此到了中世纪，则表现为在基督教色彩的两分两至日之外再加上马丁节、圣烛节、五朔节和收获节等宗教节日。

但是，史前欧洲是否存在一种具有精确观测的、甚至有可能导致对天象预先推算的、准科学化的天文学？在不列颠，现在已知建于公元前2000年前后的巨石阵，它们被认为是基于天文学的原因而排列起来的，这种看法可以追溯到18世纪。而到了20世纪初，一位才能卓越的天文学家诺曼·洛克耶爵士可以这样写道：“就我自己而言，我认为我们古代的巨石阵是为了观测和标志天体升落方位而建造的，这种观点已经完全确立。”

这一话题在20世纪60年代随着一本关于巨石阵的书的出版而吸引了公众注意力，此书的作者自己就是一个天文学家，他宣称，除了夏至日太阳在踵石后升起这一众所周知的天象之外，在巨石阵中还有许多天文学排列。他指出，进行持续多年有规律的观测，利用巨石阵中的各种结构，追踪太阳的周年运动和研究更为复杂的月亮运动周期，这些从技术上说都是可能的。甚至可以预报交食——作者强调，这一点正是巨石阵当初的用途之一。

如果巨石阵真的曾经是许多其他环形遗迹中的一员，那么应该可以考察那些遗迹是否曾扮演过相似的角色。不幸的是，在这个世界的任何地方都没有巨石阵的相似物——它即使在远古时代也是一个奇迹。对它的解释则由于下面的事实而

① 在北半球，天体在正南方到达当地最大地平高度，称为上中天。——译者注

② Druid，古代凯尔特人或不列颠人中有学识的人，担任祭司、教师、法官或巫师等，他们在威尔士及爱尔兰传说中是预言家和占卜家。这里是本书作者的幽默之辞，借指那些迷恋古代神秘事物的人。——译者注

巨石阵：古代的天文台?

巨石阵的排列与夏至日出方位，也许是欧洲西北部古代天文学遗迹最广为人知的显示了。然而，尽管有公众的强烈信念，对于现代天文学家来说，将巨石阵与精确的天文学排列或某种古代天文台的功能联系起来，还是不太可靠的。但是就像在不列颠岛上矗立着的其他新石器时代晚期至早期青铜时代的仪式遗址那样，巨石阵的天文学象征是极为重要的。这些遗址，也许我们会猜想有某种具体的用途，比如指示一年中的农时之类，其实它们更多地是与宗教、意识形态和政治有关。

关于巨石阵，最少争议的说法是，沿着其主轴方向，可以发现不同的台阶，一处正对着夏至日日出方位，另一处则正对着冬至日日落方位，而这是有意安排，并非偶然形成的。不过其精度充其量也就是二至三个太阳视直径（太阳视直径约为0.5°——译者注）。一种通常的看法，认为最后那块被称为“踵石”的巨石，更精确地定义了夏至日的日出方向，这其实也是很靠不住的，因为假想的观测位置（巨石阵的中心）无法足够精确地确定，而踵石因为离中心太近，对于它背后的广阔地平线来说，无法提供足够精确的前视照准。

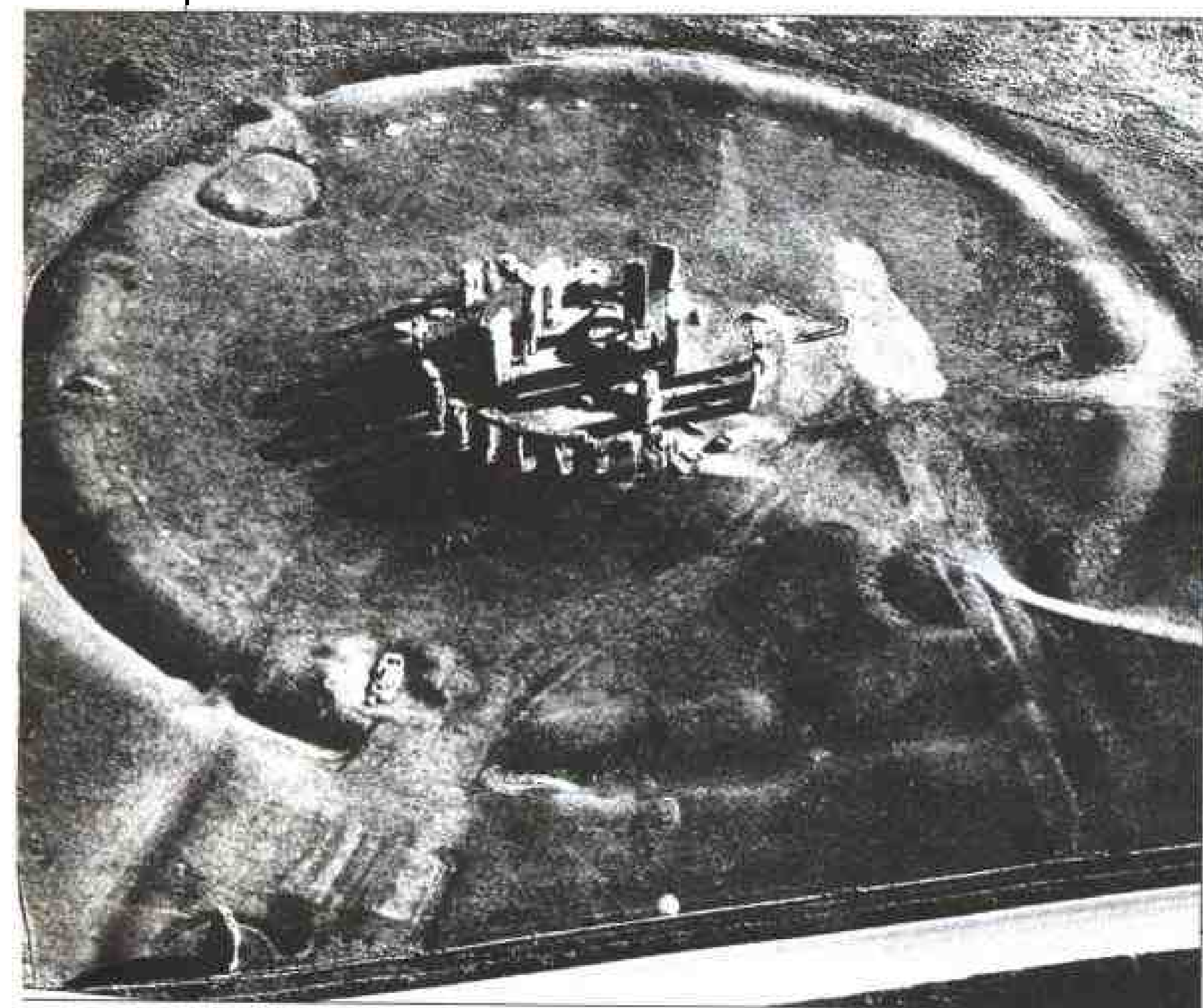
许多巨石阵的研究者在这里找出了各种特征，并试图发明一种理论来解释这些特征。即使在这样做时毫无偏见，但是要将某种天文学的（和几何学的）理论结构加于其上时，仍有很大的危险。因为这些特征只有非常有限的例证，而遗址本身几千年来又已经有了很大的改变——这是显而易见的，比如有被挖掘过等情况的发生（但该遗址还有很大的区域尚未被发掘）。举例来说，现在我们知道，踵石在很久以前一直有一块伴侣巨石，而这块巨石直到1979年才在一次营救作业中被发现。

一些最著名的用天文学解释巨石阵的理论认为，依据统计学的论证，巨石阵中两点之间的排列数目，某种选择可能是有天文学意义的。这些论证在许多地方都失败了：点的选择缺乏充分的理由，某些点的选择在考古学方面也有疑问；概率计算中的数值问题；以及也许是最重要的，数据的不独立（例如，除了在多山地区，一条大致指向夏至日日出方位的直线，总是会自动在另一端指向冬至日日落的方位）。如果考虑到这些因素，那就无论如何也没有什么证据能够被留下来支持这类“天文学方向”了。

有一种假说认为，巨石阵中的56个“奥伯雷坑”（Aubrey Holes，17世纪这些坑被发现后由John Aubrey所命名）曾被用来预报交食——如果将标识逐个坑移动一周的话。问题在于，即使这确实是一个现代天文学家利用巨石阵结构来预报交食的可行方式，也仍然有许多考古学上的证据表明，史前时代使用巨石阵的人们并没有这样做过。事实上有许多所谓的“环形结构”的巨石遗迹（就像巨石阵在具有其独特的蓝砂岩及砂岩结构之前的原初形态）有环形排列的柱坑，其内还发现了壕沟，这些坑的数目少的不足20个，多的大于100个。

另一方面，在环绕巨石阵的区域，随着从新石器时代走向青铜时代，出现了从太阴符号向太阳符号的转变。这反映在这两个阶段墓葬界石的不同排列方向上，也反映在巨石阵轴向从早期的太阴排列向晚期的太阳排列的明显转变上。一群位于巨石阵东北“入口”——即“奥伯雷坑”环和“踵石”之间壕沟上的一条裂隙——处的柱坑，或许可以证明该轴的原初结构是起源于月亮升起方位的一个端点，尽管这一解释仍有争议。

简而言之，有足够的理由认为，巨石阵和与此有关的遗迹的结构中包含着天文学象征，但是我们迄今尚无令人信服的证据能够表明，这里曾有过科学意义上的天文学活动。



从空中俯瞰的巨石阵。其轴大致与“踵石”（见图左下方边缘）成一线。外环的白点就是现代天文学家可以用来进行交食预报的“奥伯雷坑”。

变得更为复杂：它在两千年的时期内已经被构造、修改和重构。更何况，我们今天看到的这些巨石，可能已经不再准确地位于它们当初被竖立起来的位置上了；而当初竖立它们的时候，也未必就能保证被精确地竖立在建造者设计好的位置上。我们也不能从地下唤起巨石阵的建造者们而问之，他们也没有留下关于设计的书面记录，因此我们不得不向不确定性后退：我们必须问自己，现在这些在我们眼中有着天文学意义的巨石排列，如果不是出于偶然，而是出于精心设计，那后者究竟有多大的可能性？也就是说，研究巨石阵必将使我们陷入统计学——而对统计学来说，只调查一个样本是没有统计学意义的。

在20世纪60年代，正当巨石阵吸引着公众注意力和引起争论之际，亚历山大·汤姆（Alexander Thom，1894–1985），一位退休的牛津工程学教授，一直在埋头进行他自己的"巨石阵作业"——以专业标准测量了数百个保留在不列颠、爱尔兰和法国北部的巨石阵和其它用巨石构成的环形遗迹。汤姆是一个事实的收集者。许多收集事实的人害怕思索，但汤姆不是这样，他认为，这些用巨石构成的环形遗迹，不仅是根据复杂的几何学设计构造而成，而且这些巨石的安放也都经过精密的测量，使它们的位置正好可以提供非常精密的天文学观测。

早在1632年，伽利略（Galileo）在他的名著《关于两大世界体系的对话》（*Dialogue on the Two Great World Systems*）中，谈到他如何借助大自然提供的天然的免费"仪器"精确观测夏至时刻：

> 在靠近佛罗伦萨的我的乡村的家里，我清楚地观测到了太阳到达、尔后又离开夏至点的过程。在一个黄昏，当太阳落山时，它一下就消失在大约六十英里之外的皮尔特拉帕那山一块岩石后面，只留下未被遮蔽的一条向北的光束，其宽度不到太阳视直径的百分之一。而下一个黄昏，同样的日落，显示了同样的景象，但那束光明显变得更小了，惟一的解释就是太阳开始从北回归线后退了。①

汤姆相信，他所研究的那些巨石环形遗迹的建造者们，在3000年甚至更早的时候就已经预演了伽利略所描述的那一幕。他主张，有些立石是天文学性质的照准装置，它们的位置是经过仔细选择的，以便让它——比如说，两至日的太阳，或是朔日前一天的月亮，正好能够被观测到没入远山后面——非常像伽利略所描述的那样。汤姆猜测，祭司们借助这些有特殊意义的有关太阳、月亮天象数据的知识，甚至能够预测交食，能够增强他们在社会中的特殊地位。

一点也不奇怪，汤姆成了争论的中心：在远离人类文明发祥地东地中海地区的区域中，出现如此复杂精巧的史前遗迹，对许多考古学家看来都是难以置信的。为了评估汤姆这些头头是道的说法，有必要知道他是不是因为预先知道了那些巨石的摆放是有天文学目的，才将他的注意力集中到从某些位置看出去的有特殊性

① 这里说的当然是太阳的周年视运动，这种视运动实际上是地球绕着太阳公转所造成的。在夏至这一天（总在公历6月22日左右），太阳看上去运行到了黄道上距离天球赤道——就是地球赤道在天球上的投影——最远的那一点，这一点所代表的纬度（约北纬23.5°）线，被称为北回归线。从夏至的第二天起，太阳又逐渐向天球赤道靠拢。而另一方面，在北半球，对同一观测地点而言，夏至这天的日落方位是西北方向最偏北的，从下一天起日落方位就开始向南移动，所以当伽利略在第二天看到向北的那束光变得更小了，就能断定是太阳开始从北回归线后退了。——译者注

米诺卡的陶拉圣坛

在新石器时代和青铜器时代（典型的年代是公元前3500－前600年），有好几百处古墓和数量稍少的圣坛，皆由石头建成，属于各种不同的文化和亚文化，分布在地中海地区的中部和西部。大部分遗址都有一个入口和一条对称轴，因此就会有一个可以明确定义的方向。考古学的田野工作表明，在选择这些古墓和圣坛的方向时，建造者几乎毫无疑问地总是遵从当地的风俗习惯，尽管这些风俗习惯每一处都不同。

推测这些风俗习惯背后潜藏着的动机，通常总是危险的。这些动机也许和天空有某种关系，也许没有。但是我们有一个颇具说服力的关于天文学风俗的例证，见于西班牙米诺卡岛——当地的青铜文化约在公元前1000年左右达到顶点——上的陶拉圣坛。那个圣坛包括一个有墙围起来的区域，其中心就是"陶拉"：一块平坦的厚石板，垂直竖立在地面，厚石板顶上一块水平放置的石板。从陶拉正面越过入口向外望去，几乎就是正南方。意味深长的是，陶拉总是被安放成让向它膜拜的人能够看到完美的地平线。这一点为什么重要呢——今天从那里向南看去并无任何值得注意的景象。

我们可以通过回推计算岁差的作用，来寻找可能的答案。岁差是由于太阳和月亮对地球赤道隆起部分的引力作用，导致地球自转轴出现周期性的摆动，其效应经过若干世纪的积累之后，会使得所有恒星的视位置发生偏移。我们发现，公元前1000年时，在米诺卡，南十字座是可以看到的：它在南方升起，紧接着是半人马座β星，再接着是半人马座α星——在米诺卡岛上能看到的第二颗最亮的恒星。这一显著的星象（见本书第14－15页）对于许多文明来说都有重要意义。如果像看起来可能的那样，将这一点与在陶拉圣坛进行的祭祀仪式联系起来，我们就会对米诺卡岛上史前居民的宗教有所了解了：他们很可能与埃及有联系，在埃及星座总是和神性结合在一起的。

特莱普科的陶拉，现位于米诺卡岛猫港市郊。图中前景是其入口区域，进入即面对陶拉，左右皆为残剩的围墙及在围墙内侧间隔竖立的立石壁柱。陶拉后面是一个塔，或名为"塔拉夭特"（talayot）。这些建筑遗迹的用途尚未确定，但可能被作为建造了它们的村庄的某种地位的象征。



质的天际线？质疑者提出，如果这样的天际线沿着许多山峰展开，其中某个山峰恰好对着——比如说冬至点日落方向，那这些山峰的排列很可能就纯属偶然。

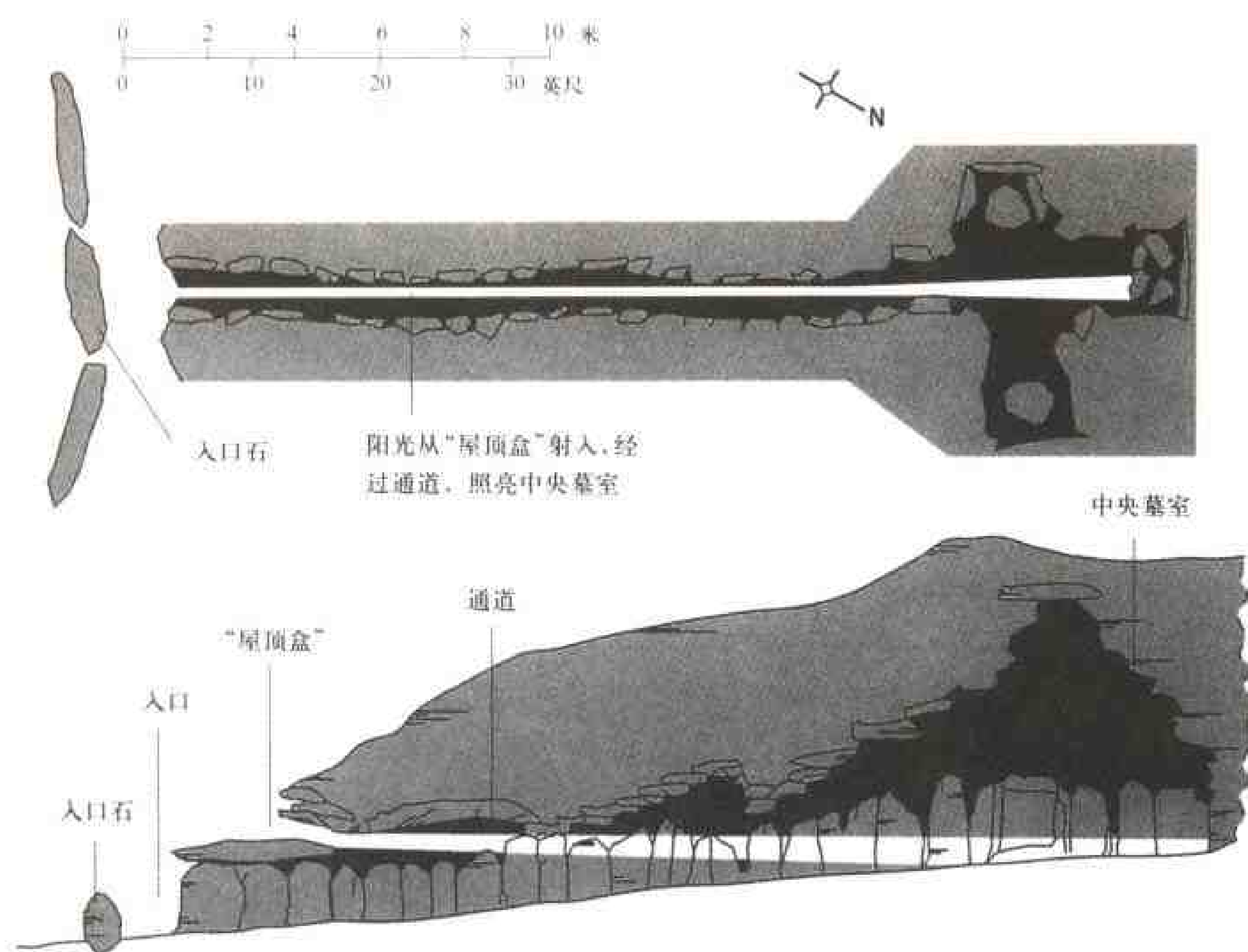
汤姆所研究的遗址，因此被用精心设计的程序重新考察，以确定他所提出的说法的客观性。争论还在继续，但是重新考察的结果，对于汤姆所主张的认为在史前不列颠存在着一种具有预测天象能力的科学天文学之说，其可信程度是大大减少了。然而汤姆的工作的真实价值也是持久的：今天，各地的史前历史学家的研究工作，正在增加一些作为史前居民文化资源的天空的知识。

避免在宗教仪式和高水准的有预测能力的天文学之间进行错误的割裂，是非常重要的。赫西俄德（Hesiod，古希腊诗人——译者注）所描述的，早期希腊农夫通过观测星座的偕日升——星座消失在太阳升起的光芒中——数个星期之后，重新在拂晓的天际出现，来获知宜于播种的季节，是低水准预测的例子。而伽利略型的精确观测，可以通过简单竖立在地表的柱状物构成后视照准，而被充分地记录下来，因此巨石阵如果确实是被竖立起来作为照准之用，那它们肯定还有一些别的可能的仪式性质的用途。

有关的争论如今是何种情景呢？在欧洲北部，关于史前天文学最令人信服的证据已经被注意到了：包括在爱尔兰的约建于公元前3000年左右的新格兰奇通道

爱尔兰米斯郡之新格兰奇的巨型通道墓入口，当冬至日日出时，阳光会通过位于上方的所谓“屋顶盒”，照亮长长的通道。前方则是有着华丽凹刻纹饰的入口石，这些纹饰与冬至日有关，更多的纹饰隐藏在“屋顶盒”的内部，包括一个有短辐射线的圆环，也许象征着太阳的升起。





新格兰奇，俯视图和横剖面图，显示冬至日日出时阳光射入墓中的通道。该墓外冢长约250英尺，高30英尺有余。

墓。从这座墓南面的入口开始，一条62英尺长的通道导向20英尺高的中心墓室，从中心墓室又可通向3个侧墓室。墓建成后的某个时间，许多骸骨已被放置在墓室之中，墓的入口即被一块巨石所封闭。虽然墓中从此再没有生命的活动，但是仲冬的太阳光却通过那个难以解释的"屋顶盒"——位于墓入口上方的一个狭长切口——年年射入墓中。在冬至日前后有约两个星期的时间，每天日出时，阳光都会穿过通道而照亮中心墓室——至今仍是如此。如果认为这纯粹出于偶然，认为"屋顶盒"可以有别的解释，都太令人难以置信了，新格兰奇通道墓无疑是深思熟虑地被构建成面对冬至日日出方位的。

但是这里的阳光是被安排成照射到死人的骸骨上，而活着的人是看不见的；即使有活人占据了中心墓室，他也只能获得关于冬至的非常近似的数据。显然，这里并没有如同汤姆所宣称的 "能预测天象的科学的天文学"，汤姆认为这样的天文学在其它一些遗址具有"存在的理由"。

汤姆研究过的遗址中，一个特别有趣的例子，是苏格兰的金泰半岛的巴罗克罗伊。那里有一列三块竖立着的巨石，其中两块是薄平板形，指示着与这一列巨石连线交叉着的方向。离此不远处是一个长方形的墓葬石柜；石柜由石块排列而成，其长端也指向与上述两块薄平板形巨石所指的相同方向。

在两至日——仲冬或仲夏之日——附近的日子里，日出和日落方位的变化几乎是难以察觉的：在至日之前或之后的一个星期之内，日出或日落方位的变化幅度，在这个纬度上，只有太阳视直径的大约三分之一（即10′左右——译者注）。这使得确定两至日相当困难。两至日必须基于对太阳周年运动的知识方能确定。

而汤姆相信，巴罗克罗伊那些史前时代的巨石竖立者，已经通过设计这些巨石的位置而克服了上述困难——从这里可以看到，冬至日的太阳在7英里外的卡拉岛落下地平线，而夏至日则没入19英里远处的克拉贝恩山。虽然日落的方位在某日黄昏和次日黄昏只相差几弧分（1弧分是1°的60分之一），在准确的两至日前后数天之内，这一变化对观测者来说是可以发现的，因为大自然所赐的巨大观测“仪器”（指上文所说的远处的山——译者注）提供了这个精度。据汤姆说，这三块巨石的连线指示了冬至日日落的方位，而夏至日的日落方位则由中间那快巨石的平面所指示。

在考察这一理论时，有一个问题是，我们忽略了这些巨石竖立的准确年代，其年代可以有几个世纪的出入。尽管从一个千年到下一个千年，太阳周年运动的南限和北限只有轻微的变化，但是当我们用数十英里长的“仪器”来观测时，这已经足以造成重要的误差。在一个遗址，远处的山峰总可以提供某种大致正确的方向，这就非常有可能为汤姆的理论所需要的异乎寻常的特征提供某个数据。就像那些“指向”是在石头上基于想象和推理而建立起来的这类天文学特征，往往是研究者本人已经相信他所研究的遗址具有天文学目的之后，才被辨认出来。举例来说，汤姆就将注意力集中在巴罗克罗伊三块巨石的中间那块之上——因为这一



位于苏格兰金泰半岛上巴罗克罗伊的三块竖立巨石。中间的那块可以看见明显的边缘，亚历山大·汤姆相信是“指向”远处的克拉贝恩山，那是夏至日太阳落山的方位。但是，右边的那块薄平板形巨石，似乎没有什么有意义的“指向”，而左边那块巨石则不是薄平板形的。向左面的方向，这三块巨石的连线指向冬至日日落之处，但是视线被附近的覆盖着墓葬石柜的界标打断。

块大致指向了"正确"的方向，他不去注意最北端的那块——因为它没有"指向"什么有意义的方向。他截断了（本来应该更长的）三块紧密相邻的、巨大而不规则的立石行列，以一种相当缺乏根据的精度，辨认出这三块巨石"有意的"排列方向，认为其中平板形的两块"指出"了交叉的方向。在巴罗克罗伊，还有一个困难，是邻近的墓葬石柜上史前时代所覆盖的界标，这一界标遮蔽了望向冬至日日落方位的视线；事实上，在一张17世纪所绘的该遗址的草图上，界标还依然可见。

因此，一般说来，即使我们可以假定，伽利略的方法对于史前的欧洲人来说是可行的（如在别处那样），那种认为史前时代的苏格兰工程师已经发现了预测天象的科学的主张，按目前的情况来看只能是"此案查无实据"。

美洲的早期天文学

一个研究史前欧洲天文学的学生，事实上既没有书面的，也没有口头的历史证据来指导他，他所研究的巨石阵也只是很初级的结构。而在美洲热带发展起来的高级文明，在这方面有丰富得多的遗产。许多非常复杂精密的建筑保存至今；研究者有机会询问他们尚存的后裔；我们还拥有各种类型的文字记载——石刻碑铭和其它富有意义的雕刻、已知的作为法律的玛雅树皮书之类的文献、西班牙人首次进入该地区以来与玛雅文明进行交往的详细报告等等。



繁荣于16世纪中叶被征服时期的秘鲁的印加社会，有一个奇特方面，主要是由于研究西班牙殖民者在征服它不久撰写的报告而被揭示出来。这就是"赛克斯"(ceques)系统，意即从印加帝国首都库斯科（Cuzco）城中心的宗教巨石建筑科利坎查（Coricancha）——太阳神庙——向外辐射的直线。有41条赛克斯线，沿着这些赛克斯线，分布着宗教的巨石建筑，用以将社会区分为不同的部分。有些赛克斯线含有天文学意义，例如，太阳能够到达当地天顶之日的日出方位，而其它一些赛克斯线，指向远处地平线上那些有神圣宗教意义的山；另一些则与河流及灌溉设施中水的流向有关。由此可见，赛克斯射线系统与土地的特殊划分、与社会阶层的划分、与地理特征、与天文事件都有关系。大



150英尺长的蛛形图案之航空摄影，这是占据纳斯卡大草原一角的最著名的动物和鸟形图案之一。更常见的是四边形、三角形、螺旋形和长直线，有宽有窄，有些可以在此图上看到。多种多样的特征，有些后来的覆盖了早期的，时间跨度可能长达几个世纪。有些线条的排列是有天文学意义的，但是天文学只是这些符号和象征中很小的一部分，这些符号和象征原是为祈求使土地免于空寂不毛的宗教仪式服务的。

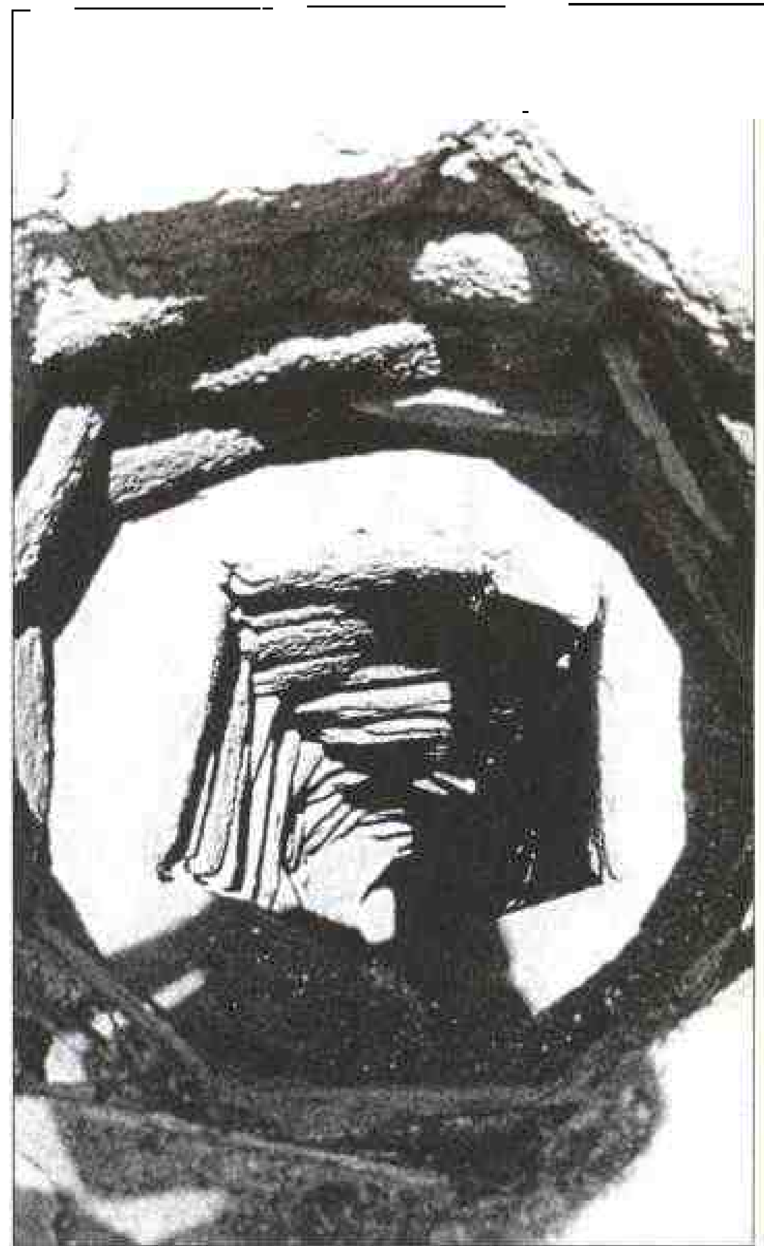
文学只不过是这个覆盖着社会许多不同方面的、高度复杂的系统中的一个组成部分。

这样的射线系统，也出现于其它印加城市——虽然表现形式比库斯科城的要简单一些。事实上，这种射线概念，甚至在更早的时候已经在安第斯印第安人地区存在了，在前印加时代，当这些直线系统从某些有象征意义的处所——比如山峰、纪念碑等——辐射而出，在荒凉的南美大草原上留下了实物印迹。这类大草原中最著名的是在秘鲁沿岸地区的纳斯卡草原，那里有几十处“射线中心”，从这些中心向外的射线，由明亮的黄色沙土构成，这是在移开了棕色的石质表面薄层之后被揭示出来的。由于这一地区的气候条件是如此稳定，以致这些射线得以保存至今。

许多辐射线从一个射线中心连接到另一个射线中心，许多射线完全是直线，长达数英里。它们看起来似乎是有宗教意义的路径，有许多因素会影响这些射线的方向，像在前面提到的“赛克斯”系统中的情形，天文学是这些因素中的一个，水流方向是另一个。而在纳斯卡草原的这些射线则不同，正如有人所主张的，这些射线展现了“世界上最大的天文书”，基本上没有疑问的是，天文学的象征，包括某些有特殊意义的日子——比如太阳经过当地天顶——的日出日落方向的排列，对这些射线的构成起了作用并使用了这些射线。

太阳经过当地天顶的意义是容易理解的。在北回归线（约北纬23.5°）以南、南回归线（约南纬23.5°）以北区城内的任一给定地点，一年当中，有一段日子太阳看起来逐日向北移动，其余的日子则逐日向南移动，但在太阳由南入北或由北入南（皆指在当地看起来如此——译者注）的那两天正午，太阳会正好位于当

地天顶。毫不奇怪，太阳过当地天顶在中美洲是一个令人感兴趣的事件，在纳斯卡草原数百英里以北的地方，当这两天到来时，可以用一种所谓"天顶管"，以简单然而戏剧性的方式精确地指明——当太阳经过当地天顶的时刻，阳光会穿过管道照亮管底。



墨西哥索奇卡尔科地方一个"天顶管"的外观。"天顶管"以一种简单然而戏剧性的方式，为古代中美洲人精确指明一年中的两天——这两天中太阳会经过当地天顶：在太阳经过当地天顶的时刻，阳光会穿过管道照亮管底。[①]

就已知的历史而言，最与众不同的文明是古典玛雅，这一文明曾繁荣于今日墨西哥南部、危地马拉和伯利兹。玛雅人用象形文字书写，虽然他们的几乎所有树皮书都在16世纪中叶西班牙人的入侵中被毁坏了，但总算有一小部分保留下来，其中包括两种看来是天文学（或者不如说是星占学）的历书。

玛雅人沉溺于研究时间的流逝，并以各种结构的形式将其记录下来。他们分别使用三种不同的纪日方法。第一种是每年365日，由18个月——每月20天——和5天的附加期（不吉之日）构成。第二种是一年360日，或者称为"吞"（tun），在计算非常长的时间周期时使用。第三种也是最有意义的，是以260天为周期的神圣年历。这种神圣年历中有20个纪日专名，并以1、2……13的顺序，与此20个专名相配。[②]

20个专名中名为"阿豪1"（1 Ahau）的那天是属于金星的，金星周期的起讫就在这一天。从地球上观察，金星显示出有一个略不足584日的周期（天文学上的术语称为"会合周期"），而65次584日周期等于146个260日的神圣年历（按即65 × 584 = 146 × 260——译者注）。因而，在被称为"德累斯顿手卷"的树皮书中[③]，金星表正好覆盖了金星的65个会合周期。然而，由于金星的实际会合周期要比584日略短约2小时，所以需要有一个修正，这就要求以某种方式保证"阿豪1"位于金星周期开始的那一天。在第61个周期结束后，每个周期约2小时的误差已经积累到约4—5天之多，第61周期结束于专名为"坎5"（5 Kan）的那天，这是一个吉日，在"阿豪1"之后4天。玛雅人利用这个机会在这里减去4天，于是下一个金星周期开始之日又是"阿豪1"了。即使经过了这样的修正，仍然会有残余的误差，"德累斯顿手卷"揭示了如何利用类似的方式，在适当的时间再做进一步修正。最后的结果，是将精度提高到每481年误差约2小时。

对金星的迷恋是由星占学激发的：当金星在地球和太阳之间穿过，会无法在地球上被观测到（中国古代的术语称为"伏"——译者注），而经过了这一阶段，金星又重新作为晨星在黎明中出现，这被认为是大凶，所以玛雅人的金星表要对这一凶兆给出预警，以便举行仪式攘除将要到来的凶恶。对于金星的其它天象，从我们的几何学角度来说，其重要性比之"伏"后晨出东方有过之而无不及，却没有证据表明玛雅人对它们有过哪怕一点点的兴趣。

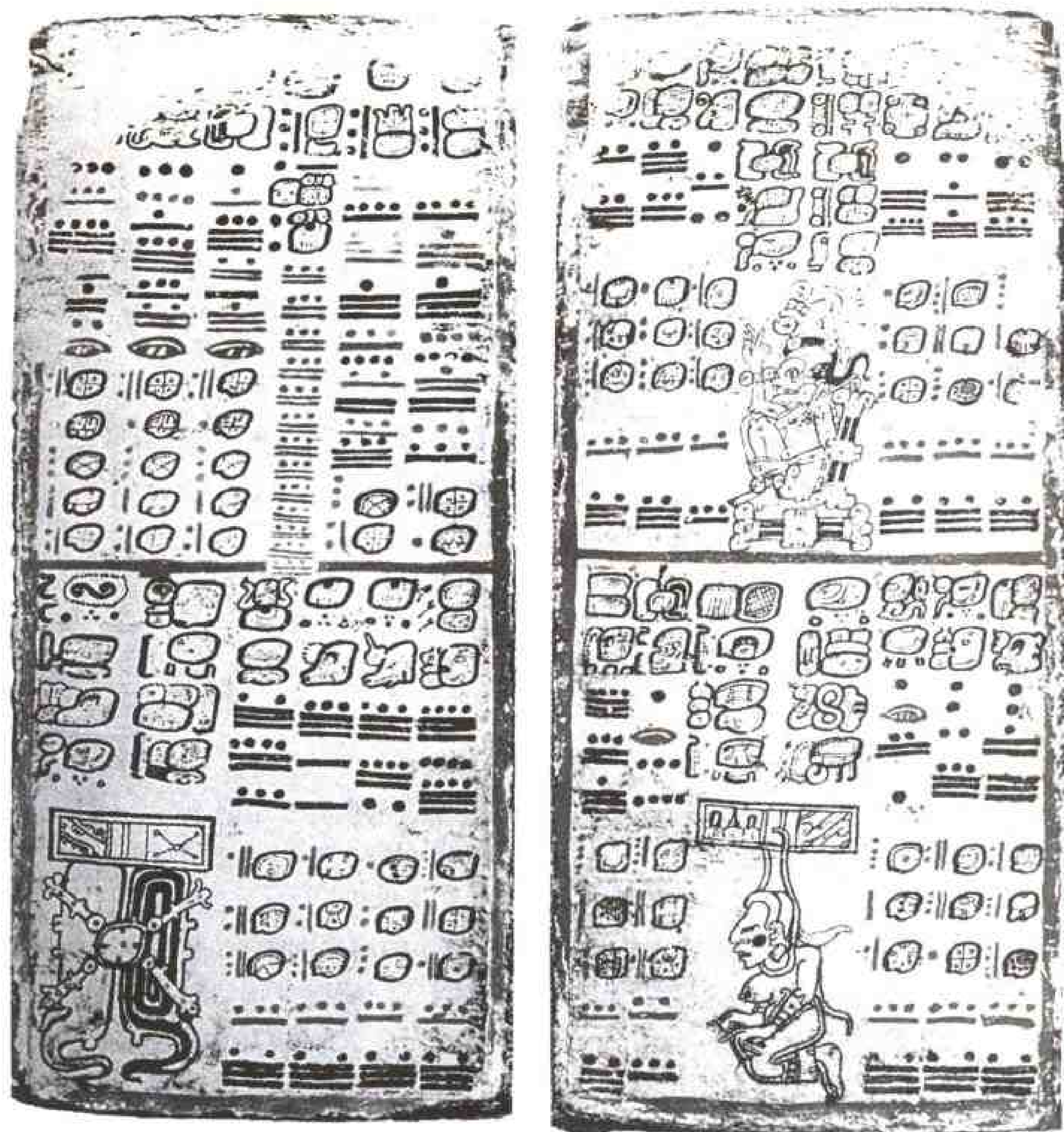
在"德累斯顿手卷"中，紧接着金星表，是一个长达8页的表，时间跨度为

① 只有在地球上北回归线以南（或南回归线以北）地区，一年中才会有这样的日子。索奇卡尔科位于墨西哥中部，正在北回归线以南。——译者注

② 这种做法有点像中国传统的干支纪日。——译者注

③ 玛雅树皮书保存下来的只有三册，分别藏于德国、法国和西班牙。此处所谈的就是藏于德国（德累斯顿）的那册。——译者注

现藏于德累斯顿的玛雅手卷中日食表的两页，圆点表示数1，横表示数5，由上往下，用位置来表示进位（在上面的位高——译者注）。玛雅人采用20进位（我们用10进位）。例如，图中右面那一页上栏的底部，紧挨王者图形的右侧第一栏数字，上为三点一横，下为两点三横，就表示：20 × (5 + 3) + (5 + 5 + 5 + 2) = 177。紧挨王者图形的左侧第一栏数字，上为两点一横、下为三点一横，就表示：20 × (5 + 2) + (5 + 3) = 148。



11960日，相当于46个260日的神圣年历。20世纪早期曾有人注意到，分布在这8页表中的天数，很像天文学上两次日食之间间隔的天数，这说明该表的作用之一就是对日食这种危险天象给出的预警。玛雅人实际上并未掌握推算出什么时刻在他们的土地上可以准确见到日食的知识①，但毫无疑问，如果这种天象未被看到的话，他们就会认为是通过举行该表上所提示的仪式而将它消除了。

该表主要包括了177天（或178天），这是6个朔望月的周期（一个朔望月约为29.53059天——译者注），有时候还会有148天的周期（约5个朔望月）。日食只能发生在地球、太阳和月亮基本处于一条直线上的时候；从地球上看，太阳和月亮每173.31天交会一次，而在这种交会日中，只有极少数日子会发生日食。玛雅人的记录肯定显示日食只发生在“凶期”——这种“凶期”每6个月（177天）出现一次，但这4天的误差，需要有时候代之以5个月的间隔（148天）来进行修正。该表得到405个月（此处指朔望月——译者注）等于11958日，这样它所用的

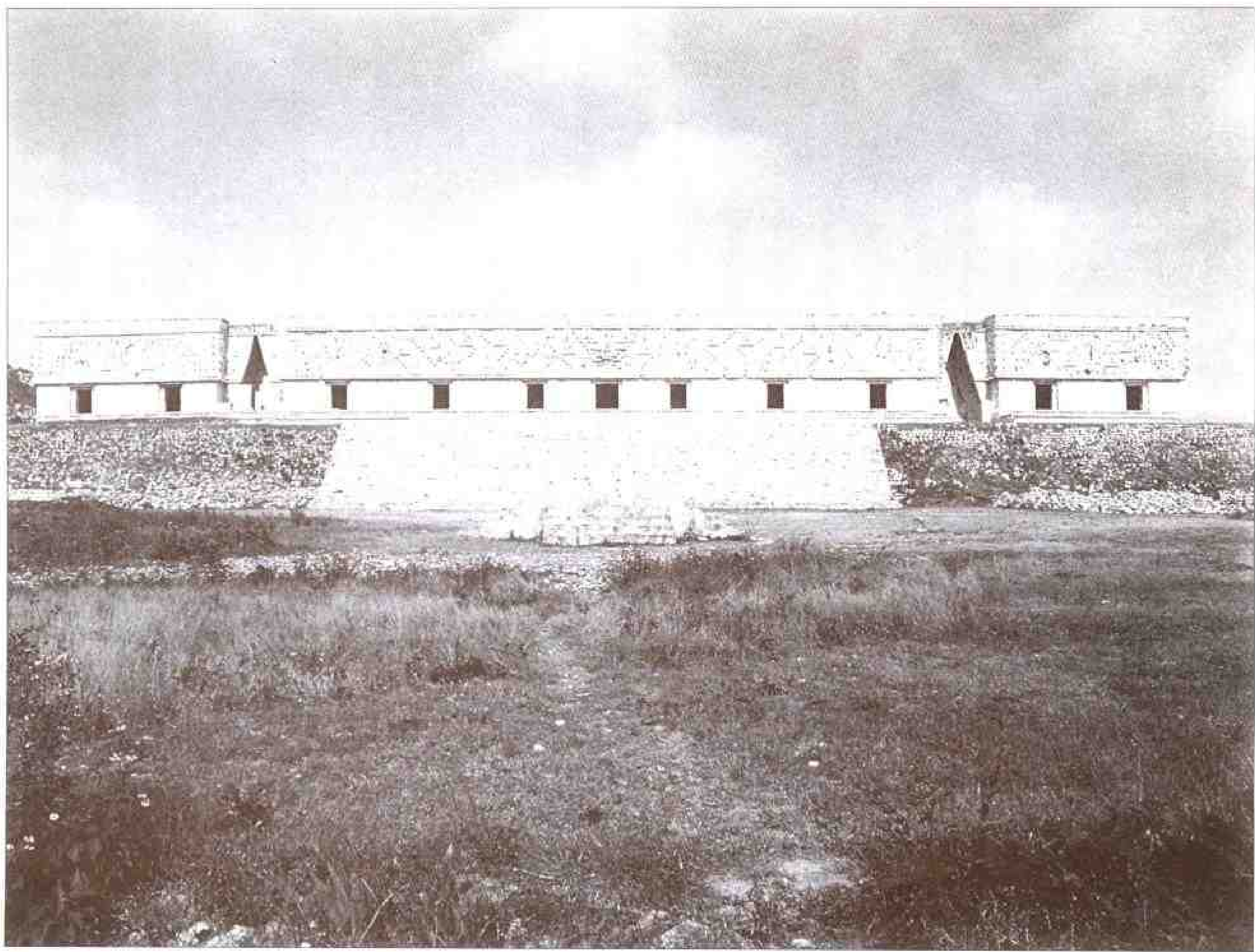
① 每次日食，在地球上只能有一条狭长地带可以见到，这通常被称为这次日食的“日食带”，推算日食带需要相当高深的数理天文学方法。——译者注

朔望月长度只比现代值短了8分钟。

该表也提供了260日神圣年历所需的历法模式，在这里以“拉马特12”（12 Lamat）之日开始。这一模式依赖于一个令人印象深刻的巧合：3个173.31日的自然间隔，约等于2个260日的神圣年历，误差只有约两个小时。对这一误差，也可以用类似修正金星周期那样的方法来修正。

必须强调指出的是，对于曲折繁复的玛雅历法来说，我们上面所述实在只是鼎尝一脔而已。这些对时间间隔——有些是人为的，有些则来自自然——的无比沉迷，如果不是有书面记载为证，几乎是令人难以置信的。但是考虑到这种沉迷，那么我们发现他们的建筑物符合天文学排列就毫不奇怪了。研究者再次面对这样的问题：这些建筑的每一个复杂结构在形式上都是独一无二的，因而在任何给出的案例中，都无法证明这些排列是有意设计而不是偶然形成的。一个很好的例子，是在尤卡坦半岛（Yucatan，属今墨西哥）上的伟大玛雅城市乌斯马尔（Uxmal）城中的戈弗诺宫（Governor's Palace）。这一巨大宫殿的朝向与它周围的建筑物都

墨西哥尤卡坦半岛乌斯马尔城的所谓戈弗诺宫。从这一宫殿通过一个巨大的金字塔，指向金星在最南方升起的方位，而其相反方向则指向金星在最北方没入地平的方位。在该宫殿的正面墙上有数百个金星的浮雕。



严格计算的话，如果德累斯顿手卷表中的式子是精确的405月＝11958日，则玛雅人的朔望月长度比现代的29.53059日之值只短6.71627分钟。——译者注

不一样，它面向地平线上的一个隆起——后来被证明是东南方约3英里外的一个金字塔。测量表明，这一排列指向金星在最南方升起的方位（金星从东南方向升起，这里是指其最偏南的方位——译者注），对宫殿设计者这种动机的推测，可以从雕刻在宫殿上的金星浮雕上得到支持。还有许多类似的天文学排列被指出，它们描绘了我们现今所知的玛雅人的精神世界，而如果认为所有这些排列都是偶然形成的，那就太令人惊奇了。

作为今日文化资源的天空

玛雅是一个高度成熟的文明的例子，他们对天文学的兴趣，和我们自己的相比，显得有异邦风格；如果我们将自己的思维模式强加给这个欧洲之外的异邦，就会误入歧途。

更接近大自然的现存社会，同样会给我们上生动有力的一课。比如说，在非

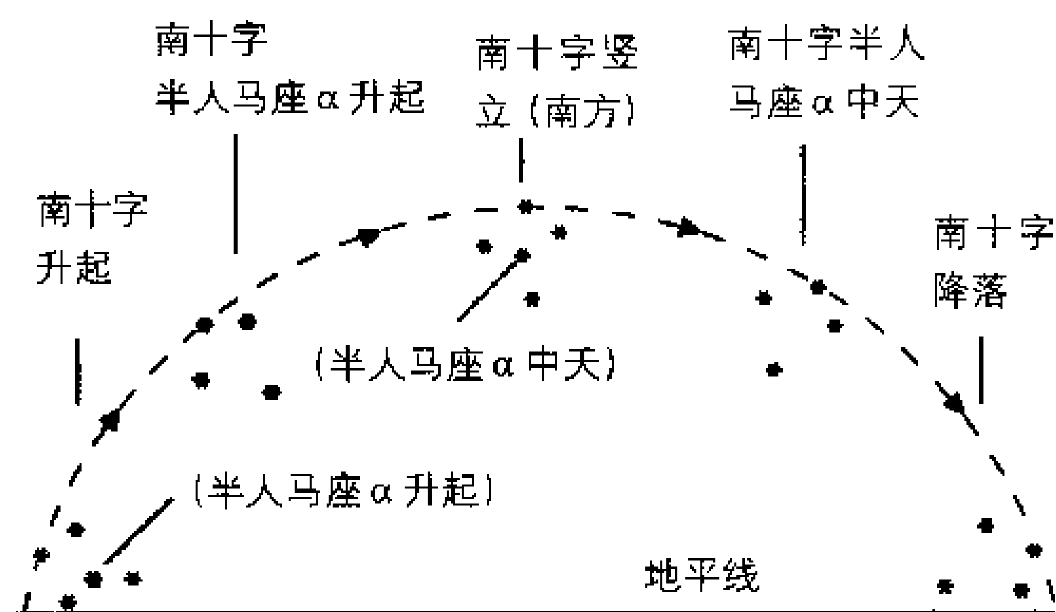
利用恒星航海（天文导航）

在海上航行至看不见陆地之处，必须经常进行恒星观测（以引导航行），但这方面的古代技术，留给考古学家的线索甚少。不过在有些地区，这种古老技术的残余仍有保存至今者。

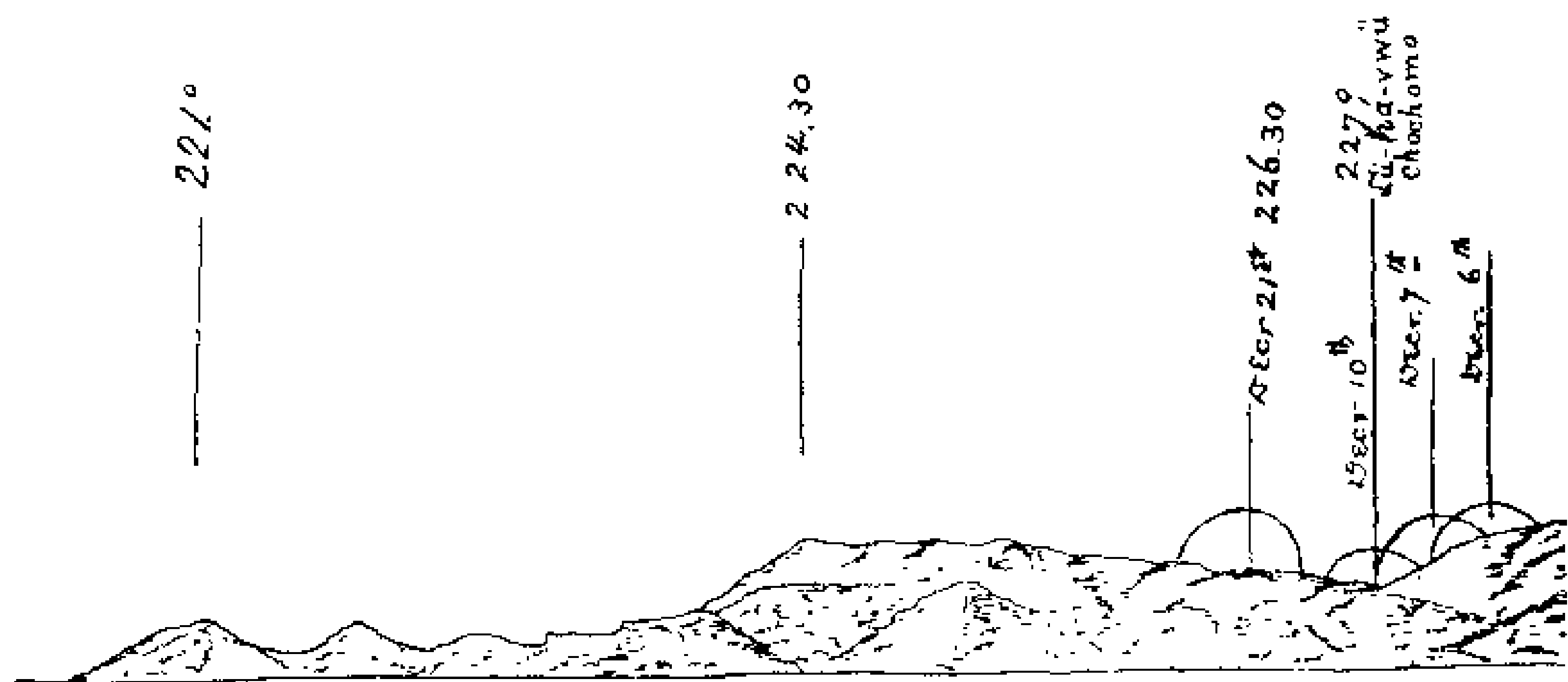
在今天的世界各民族中，很少有比太平洋上波利尼西亚（Polynesia）群岛和密克罗尼西亚群岛（Micronesia，即小岛群岛）的居民更依赖这种航海技术了。他们的航海者是专家，是秘密技术的掌握者。白天，利用太阳导航，而到了夜晚，地平线同一方位上不同恒星的交替升落，构成一条星轨。加罗林（Caroline）群岛的航海者使用一种至今仍然有效的恒星罗盘来精确表示这些星轨，极星在北方，竖直的南十字在南方，在这两者之间，是恒星或星群的15个上升点和15个降落点。他们使用上述这些点所定义的32个方位，很像我们使用罗盘指南针，南、东南……加罗林群岛航海系统中最南面的五个方位——都由南十字座和它的伙伴半人马座α星在它们的星轨上的升降所指示——显示如下：



洲，今日埃塞俄比亚西南部穆西地方的一个人，他议事日程上的当务之急就会和我们的非常不同。他的生存依赖于降雨、洪水、耕作、放牧、选定每年从一地向另一地迁徙的时间等等。然而他们并没有像我们所希望的那种“科学的”历法。他们的年由13个月组成，这样就会比太阳年（即通常所说的“回归年”——译者注）长出18天。但是他们为了使历法与一年中的季节变化同步，不是靠有时略去一个月，而是采用一种持续进行调节的制度化程序。关于现在已经到了一年中的哪个阶段，不同意见之间的平衡，取决于季节性的物候，比如鸟儿的来临、植物的开花、地平线上太阳的出现之类——所有这些都是没有精确观测的。然而，一个至关重要的事件——奥姆河每年洪水的来临——是通过历法以外的星象观察来监测的，这星象是半人马座和南十字座中四颗恒星的偕日落（太阳落山后这四颗恒星会在在西方地平线上出现一会儿，随后也落入地平线下，每年这样的天象会持续几周——译者注）。这样，从我们的眼中看来，在这个例子中，精确的时间确定是至关重要的，穆西人事实上是用了精确的而不是随随便便的方法来决定一年中的



南十字座（图中右侧），几乎垂直竖立着；通常此时它正对着南方。从南十字座向图中左边看去，从图左端开始，依次排列的两颗亮星是半人马座的β星α星。在史前时代，从地中海地区是可以看到这群恒星的，这群恒星可能是米诺卡岛上陶拉圣坛祭拜的对象（参见本书第5页）。今天，这群恒星被描绘在澳大利亚和新西兰的旗帜上，在地球的许多地方都被认为是有象征意义的。例如，埃塞俄比亚南部的穆西人用它们来确定自己历法中一个标准事件的时间（见本页）。而“煤袋”——南十字座旁边一块清晰可见的暗斑，构成了澳大利亚土著居民民间传说中一只鸸鹋的头部，在安第斯人一个名叫米斯米内的村庄的传说中，此暗斑则构成一只骆驼。



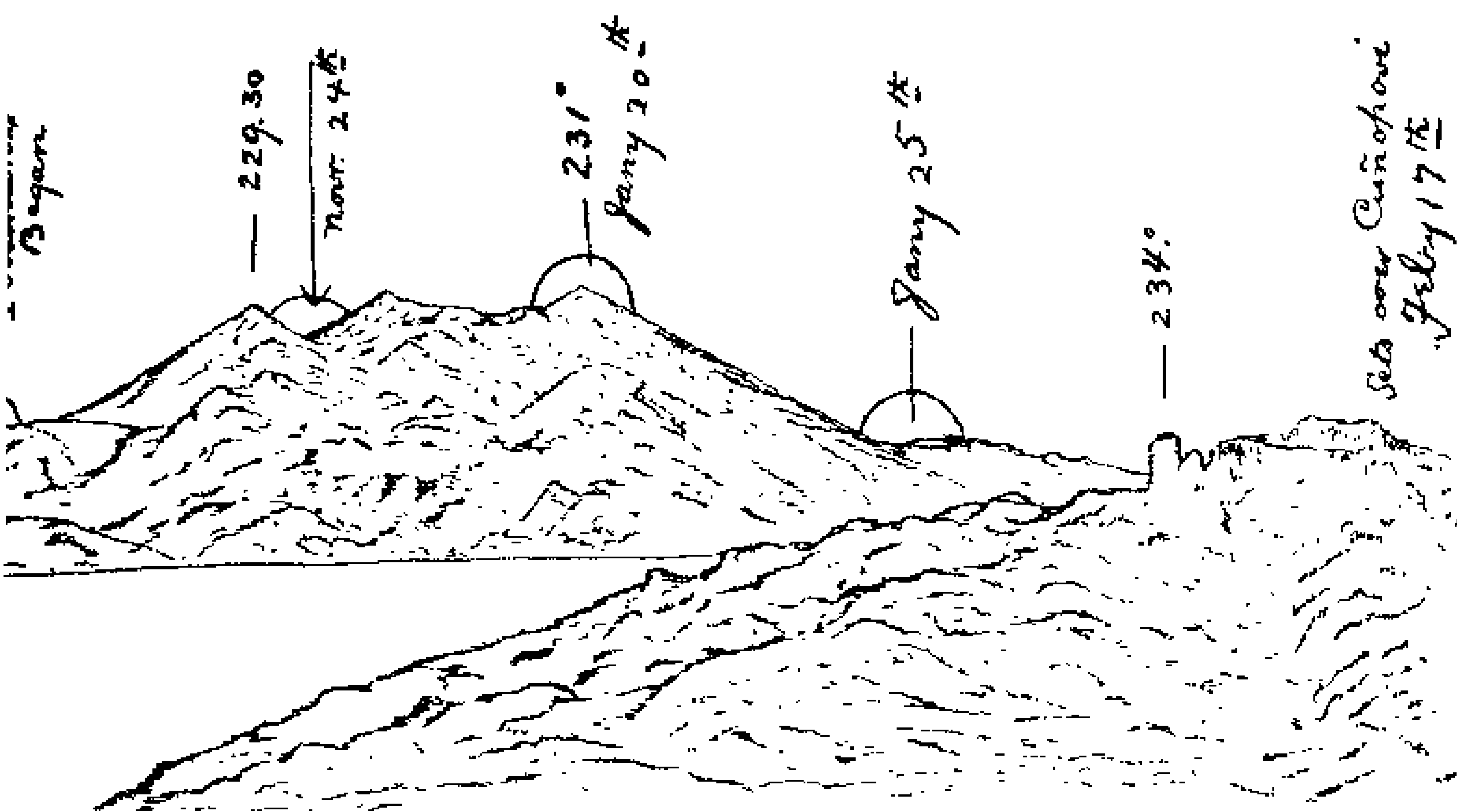
一个霍比人的地平历，由人类学家斯蒂芬（Alexander M. Stephen）绘绘。他在19世纪90年代与霍比人生活在一起。图中显示了霍比人的太阳牧师为了确定冬至典礼时间而进行的观测。在12月10日，太阳落山的方位到达那个凹口——在亚利桑那靠近福来格斯塔夫的圣佛朗西斯科峰，就是4天后开始持续9天的冬至典礼的信号。冬至大约发生在12月22日

各个时间的。但是穆西人并不从这个角度看问题。对他们来说，这些星、这条河、以及某些植物的花之间，是有着直接联系的：这些星在清晨的天空中消失，是与大地上河流发洪水、某些植物开花之类的事件相关的。

这种天空与大地之间的直接联系，在土著社会中是常见的。例如，亚马孙河流域哥伦比亚的巴拉撒那人，观察一个“毛虫美洲虎”星座，这星座被认为是地球上毛虫的父亲：随着这一星座在黄昏的天空中一天比一天升高，地上的毛虫会越来越多。对我们来说这当然只是巧合：每年某个时间星座在黄昏的东方天空运行，而毛虫则正从它们赖以为生的树上爬下来；但是巴拉撒那人却认为前者是因，后者是果。

对于遥远的安第斯村庄米斯米内的居民来说，大地和天空的联系仍然是很强的。银河被看作一条天河，它是大地上维尔卡诺塔河的映射，这两者被认为是结合在一起的系统，其功能是使水在天空和大地之间循环流转。在这个村庄，银河每个夜晚都会在人们头顶上出现两次，两次出现的方向相互垂直。这一现象在概念上好像将天空虚分为四，映射到大地上，就很像这个村庄自身的布局：从中心建筑物（现在是一个天主教的教堂）向外辐射出四条道路，同时伴随着灌溉渠道，正好将村庄分成四份。对于米斯米内村庄的居民来说，观察天体的变化，是他们的农业、个人活动和节庆的不可分割的一部分。在米斯米内及其邻近村庄所发现的这种实践和信仰体系中的一些方面，至少可以追溯到印加王朝时代。

已经消失了的土著美洲人的传统，有时可以被重新发现，因为他们的后裔和我们生活在一起，可以询问，而他们的实践活动的一些方面至今还保存着。针对亚利桑那的霍比（Hopi）已经做过一个专门的研究。他们最主要的方向，不是我们的东南西北，而是冬至日和夏至日太阳在地平线上升起和降落的方位。他们的冬至典礼称为“索亚”（Soyal），这一典礼的开始由他们的太阳牧师和索亚牧师决定，这两人在他们的村庄共同观测太阳，看太阳在远处一个凹口——80英里之外的圣佛朗西斯科峰——没入地平线。索亚典礼持续9天，从太阳牧师和索亚牧师观测到令人满意的日落景象之后4天开始。计算表明，太阳在那个凹口没入地平线，发生在冬至前一至两星期之间，因此冬至发生时，索亚典礼正在进行中。有趣的是，即使当太阳落山的位置离开地平线上那个凹口还很远，有时候观测太阳



也比确定准确的冬至更令人赏心悦目，那时太阳（赤纬）的逐日变动还能感觉出来。[①]

在本书以后的章节中，我们将致力于讨论近东和欧洲的天文学发展，是这些发展导致了今天整个世界都知道的天文科学。这些发展主要表现为文字史料，再辅之以从那些通过测量和观测活动保存下来的天文仪器中可以学到的知识。

古代保存下来的天文学方面的文字史料，仅能从公元前最后一个世纪开始。在本章中我们已经看到相对于巴比伦、埃及和希腊来说是史前的一些文化内容：公元前第二个、第三个、甚至第四个千年曾在欧洲盛行过的文化。主要是基于那些留在他们用以建造巨石阵的石头上的信息，我们尝试推测这些史前建筑者的心灵。通过观察那些尚未受到西方观念太大影响的文化中的居民——也通过观察比西班牙征服者还要优越的美洲文明的某些方面——得出证据表明，我们研究天空的热情无论如何不是惟一的，而我们解释这些沉默巨石的努力则充满危险。

当我们转向文字史料，阅读先辈们的真实书写，我们总算站到了安全的土地上。但是，将我们自己的意见、兴趣以及我们真实的天文学知识强加于前人史料的诱惑，那又是更危险的。必须牢记，天文学史是一个逆向的时间之旅——向着与我们现代思想大异其趣的那些文明，就像一个优秀的人类学家，我们必须尝试以那些文明的心灵和眼光来看这个世界。为天文学史提供独特兴味的，是这样一个事实：它的研究对象——史前文明、古代文明和中世纪文明试图理解的天空，也正是现代天文学家所探索的同一个天空。

（江晓原译）

① 太阳在天球上作周年视运动，因此一年之中，太阳每天升起和落山的方位是在改变的。太阳的周年视运动除了使它的黄经改变，还会使它的赤纬在 ± 23.5° 之间变动，而在冬至、夏至附近的那几天，太阳赤纬的改变很小，肉眼不易感觉。

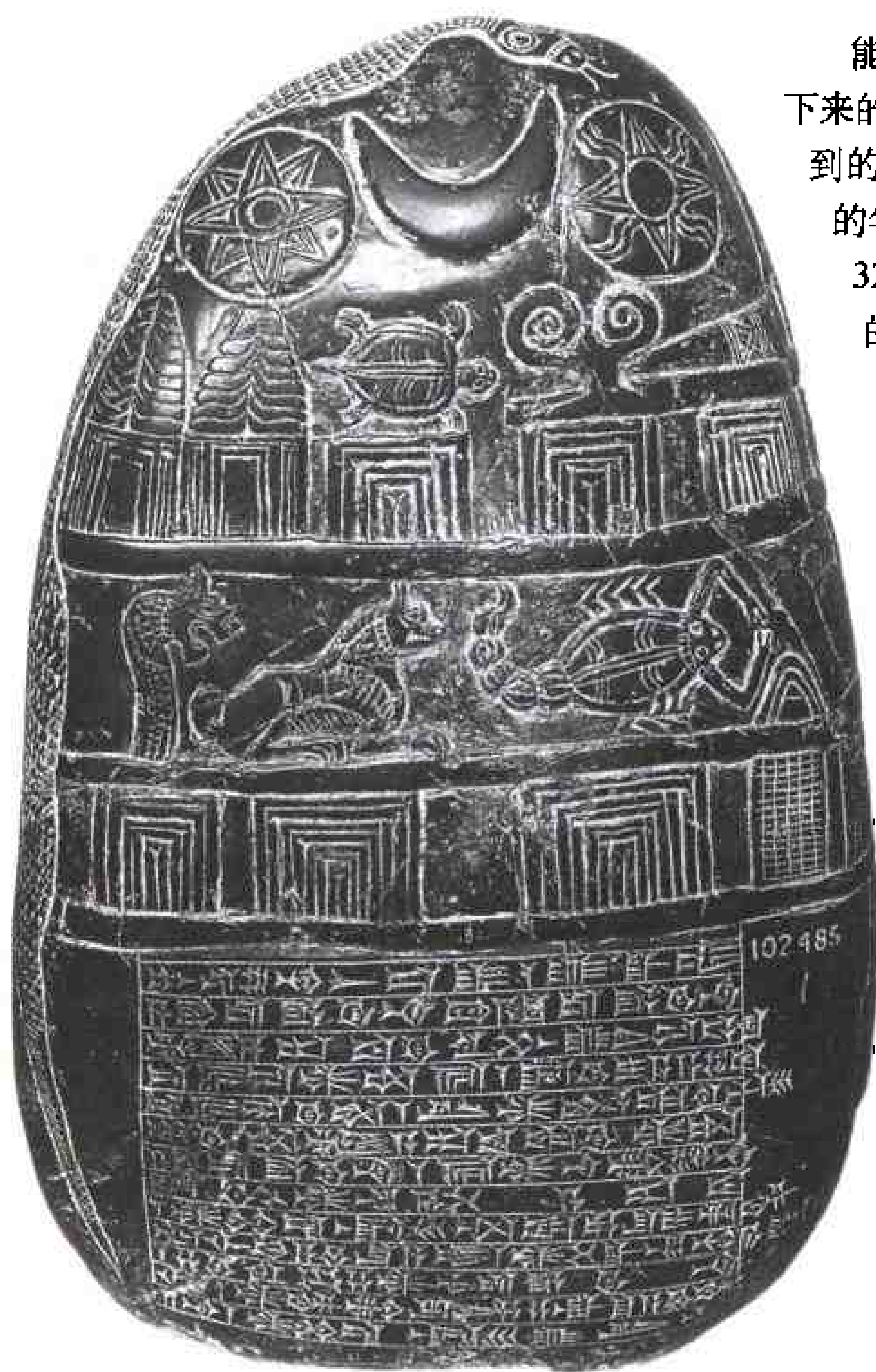
第二章 古代天文学

从古代晚期到17世纪，天文学有两个相关的目的：一是描述行星运动——这种运动不是偶然的而是有规则的，因而也是可以预言的；二是精确预报行星运动。其它事情对于天文学家来说都是无关宏旨的。

这两个目的中的第一个是希腊人的，是公元前4世纪雅典热切的哲学活动的产物。对行星运动预报精度的承诺，来自非常不同的巴比伦传统，这种传统与希腊天文学的结合，是这个世纪第三个四分之一时亚历山大大帝远征的后果。

一块美索不达米亚的界石，年代约为公元前1100年，现藏大英博物馆。中央部分是一只蝎子和一头狮子，都在黄道星座（指位于黄道上的12个星座，亦即黄道十二宫——译者注）之中，顶部图案代表金星、月亮和太阳。

原始史料



能够供天文学史家研究使用的巴比伦和希腊文字史料，保存下来的十分有限。通过发掘——以合法的方式或其它方式——得到的巴比伦的泥版，大部分比人的手掌还要小。绝大多数泥版的年代是在公元前的7个世纪之中。许多泥版写于从公元前323年亚历山大大帝去世之后开始的"希腊化时代"，也有的晚至公元前120年左右，在希帕恰斯（Hipparchus）死后——希帕恰斯可以被证明是希腊最伟大的天文学家。

这些巴比伦泥版，连同上面的表格和数据，已经保存了两千余年。而希腊人写在不耐久的材料上，他们的大部分科学著作毁于劫掠和经济压力。有一些消失无踪，因为未能有一个抄本有幸避过后来的战乱；其余的则被后来的著作取代，此后再抄写它们，其代价就显得得不偿失了。例如，欧几里得（Euclid）著名的《几何原本》（Elements），整合了——因而也就取代了——许多他的先辈们的数学工作，这使他前面的那些工作就不再被保存了，以至于他之后的数学史家必须肢解《几何原本》，将每个部分重新安放到原先的上下文中，才能重建前欧几里得时代的数学史。

对于研究希腊天文学的史家来说，情形特别困难，因为伟大的综合工作——托勒密（Ptolemy）的《至大论》（Almagest）——成书于古代后期的公元2世纪，上距亚里士多德（Aristotle）在雅典传授知识已经有五百年了。托勒密的不朽成就，哪怕就是所有被他汲取的先辈——最引人注目的是希帕恰斯——的著作全

都被保存了下来，也依然是令人敬畏的。但是《至大论》问世之后，希帕恰斯的著作就失去了它们的价值，它们绝大部分都佚失了。希帕恰斯缺席之后，对中世纪的阿拉伯和拉丁文明来说，《至大论》就成为无与伦比的、令人敬畏的遗产；对于他们的天文学家来说，托勒密这位先辈简直就是高山仰止。

当开始研究希腊人最初理解宇宙的努力时，我们发现所能得到的史料极为零散。亚里士多德在摧毁他先辈的学说之前对它们加以征引，对他的这种习惯我们实在没有什么感激可言。看起来，依靠从更早的时代继承来的神话，逐渐对自然界形成一个思索的兴趣，这兴趣导致的是理解自然界的努力，而不是去定量地回答问题的努力——后面这种努力就会引导到如巴比伦泥版中的表格和数据。可以看出，一个成熟的、具有预言天象能力的天文科学，只有在希腊化时代得以发展起来，在这个时代，希腊和巴比伦这两条路径交会到一起了。



保存至今的美索不达米亚最早的天文观测记录：金星的出现和消失，时间在汉穆拉比王朝的阿米萨杜克王统治期间。这块泥版按照当时使用的太阴历列出这些天象。对公元前1750－前1500年间金星运行状况，用现代方法进行计算，所得结果被用来与这块泥版以及类似泥版中的数据进行比较，以便确定阿米萨杜克王统治的年代，从而也可帮助确定汉穆拉比王朝的年代。

巴比伦的天文学

巴比伦城展布在幼发拉底河左岸，在现今巴格达以南约70英里处。在被称为旧巴比伦的时期（可能是公元前1830－前1531年间），巴比伦城由汉穆拉比王朝统治。随后巴比伦被赫梯人攻陷，但是很快又被并入加喜特帝国，接着是一个很长的亚述人统治的时期。亚述人的统治结束于公元前612年，这一年尼尼微城（亚述王国的都城——译者注）陷落，城中大型的图书馆被毁灭。在经过一段独立时期之后，巴比伦落入波斯人的统治；但在公元前331年，巴比伦城被亚历山大大帝的军队征服，巴比伦与希腊的文化，由此发生了直接接触。

这些从旧巴比伦时代保存下来的泥版，它们对于数学史的重要性要超过天文学史。不过它们确实显示了一个对后来天文学发展至关重要的技术：有效的数值符号的使用。写数值1，巴比伦的抄写员将他的铁笔在泥版上刃口向外侧刻画；而表示10，则刃口平直刻画。这两种刻痕结合使用，一直到数值59。而到60时，1的符号再次使用，就像我们在表示10这个数值时使用1那样[1]；类似地可以表示60 × 60，60 × 60 × 60，如此等等。0后来才出现，也没有相当于我们今天小数

① 巴比伦人采用60进位制。此处意为，巴比伦人已经采用下文所说的“位值系统”——即同一个数字符号，在不同的位置可以表示不同的数值。——译者注

点的符号，这些次要的局限并未使巴比伦人的这一“位值”系统逊色多少，这一系统使得巴比伦人能够很容易完成精确的算术计算。我们将1个小时分为60分钟，1分钟分为60秒，类似的还有对角度的划分，都反映了巴比伦人的记数法。

古代埃及的历法

和古埃及人赋予天空的神话之丰富性成为鲜明对比的，是他们在掌握天体运行方面的贫乏。这部分反映了他们在几何学方面的不足，他们也未能像巴比伦人那样发展出一个数值符号的位值系统（即一个符号所代表的值取决于它在一个数字中所居的位置）[①]。埃及人的办法，是使用他们表示1、10、100的符号，当有必要时，他们就简单地重复这些符号。当数值小于1时，他们使用分数（2/3是一个例外）但分子总是为：1/2，1/3，如此等等，也用类似形式表示这些分数之和（例如2/5 = 1/3 + 1/15），而乘法的效果则用连续的倍增来达到。显然，以这样一种初级的算术，只能够对天体运行有一个最基本的掌握。

然而，有一个天文学问题，对于结构精巧的埃及社会来说是如此重要，而不可能忽略，那就是历法。埃及人的生活围绕着一个周年事件，尼罗河神秘地上涨并泛滥而覆盖它流经的大地，当水退去之后，植物的栽种就可以开始了；随后是生长和收获的周期。有记录表明，从公元前2500年左右开始，将一年分为三个季节——洪水泛滥季、水退播种季、作物收获季——的习俗已经建立起来，每个季节通常都包括4个太阴月（即朔望月——译者注）。然而，因为每个太阴月长约29.5天，12个这样的月会比尼罗河两次上涨之间的间隔稍短一些。这样一次又一次积累起来，就使得某年的三个季节之一会有第五个加出来的（“插在中间的”）月。但是插进这个月应该遵从怎样的规则呢？

天空中最亮的恒星是天狼星（Sirius）。一年中有一段时间，太阳的方位会靠近天狼星，天狼星因此就会看不见——隐藏在太阳炫目的光芒之中。然后，有一天清晨，在黎明日出之前的东方天空中，天狼星又短暂地出现了，用术语来说就是它的“偕日升”[②]。有时，天狼星的偕日升正好发生在尼罗河上涨的时候，某些不知名的天才发现，通过设计一种规则，确保天狼星偕日升总是发生在一年中的第12个月，就有可能控制历法中“年”的准确长度。

三季年的长度超出12个太阴月大约11天。这意味着，如果天狼星偕日升是发生在本年第12月的最后11天中，那么——除非采取措施——下一次天狼星偕日升将出现在（第三年的）头一个月，这样就错了。为了避免这一点，什么时候天狼星偕日升发生在12月之后，就宣布本年插进第13月。

这样的历法适合宗教节庆。但是埃及已经发展出高度的社会结构，月份有时是29天，有时是30天，年份有时是12个月有时是13个月，必然很不方便。人们认识到，三季年的长度是接近365天的，另一个不知名的天才设计了一个系统，每年都是精确的12个月，每个月都是精确的30天，每个月又分成3个10天的“星期”。在每年12月的末尾，加上附加的5天，使得一年正好是365天，永无变动。

这个行政历法可能在公元前3000年之后就已经出现，和前面所说的那个宗教历法同时存在。因为这个行政历法允许年的天数无论怎样都不变化，任何两个日子之间的天数，在这个历法中都是容易计算的，因为有这个方便之处，埃及的天文学家使用这个历法直至现代早期（通常是指公元16—17世纪——译者注）。但是，年（这一节中所说的年都是指回归年——译者注）的实际长度，事实上比365天要长出几个小时（这就是我们现在的公历中为什么要有闰年）。这意味着在很久以前，行政历法就已经和三季年不同步了；但是官僚化的埃及人宁肯坚持使用这种历法，也不去修订它使之与实际吻合（甚至发明了第三种历法，一种太阴历，来替代行政历法）。一直到公元前239年，埃及人才做出努力，引进了一种闰年体系，使得行政历法得以与三季年保持同步。

① 例如在我们今天的十进位系统中，数字153中的“5”由于在十位数的位置上，就代表数值50，而“1”在百位数上，就代表100，等等。——译者注

② 之所以只是“短暂地”出现，是因为，此时天狼星和太阳的方位仍然很靠近，天狼星刚刚在东方天空升起不久，太阳也跟着升上来了，于是天狼星很快又消失在已经被太阳照亮的天空中。——译者注



登泰拉地方（在上埃及——译者注）神庙中一座礼拜堂天花板上的天文图案，由拿破仑远征埃及时（公元1798—1801年）的随军学者所复制。黄道星座构成内圈，中心稍微高出天花板，在这之间描绘出作为众神所拥有之仆人的行星。构成外圈（靠近支撑天球的众女神之手）的是36旬星（decans），它们可能既是参与神圣仪典的神祇，同时又是夜间时刻的指示者。

恒星指示夜间时刻

埃及神庙中的记载表明，有些节庆需要在夜间的特殊时刻举行。但是埃及人在夜间如何测定时间呢？

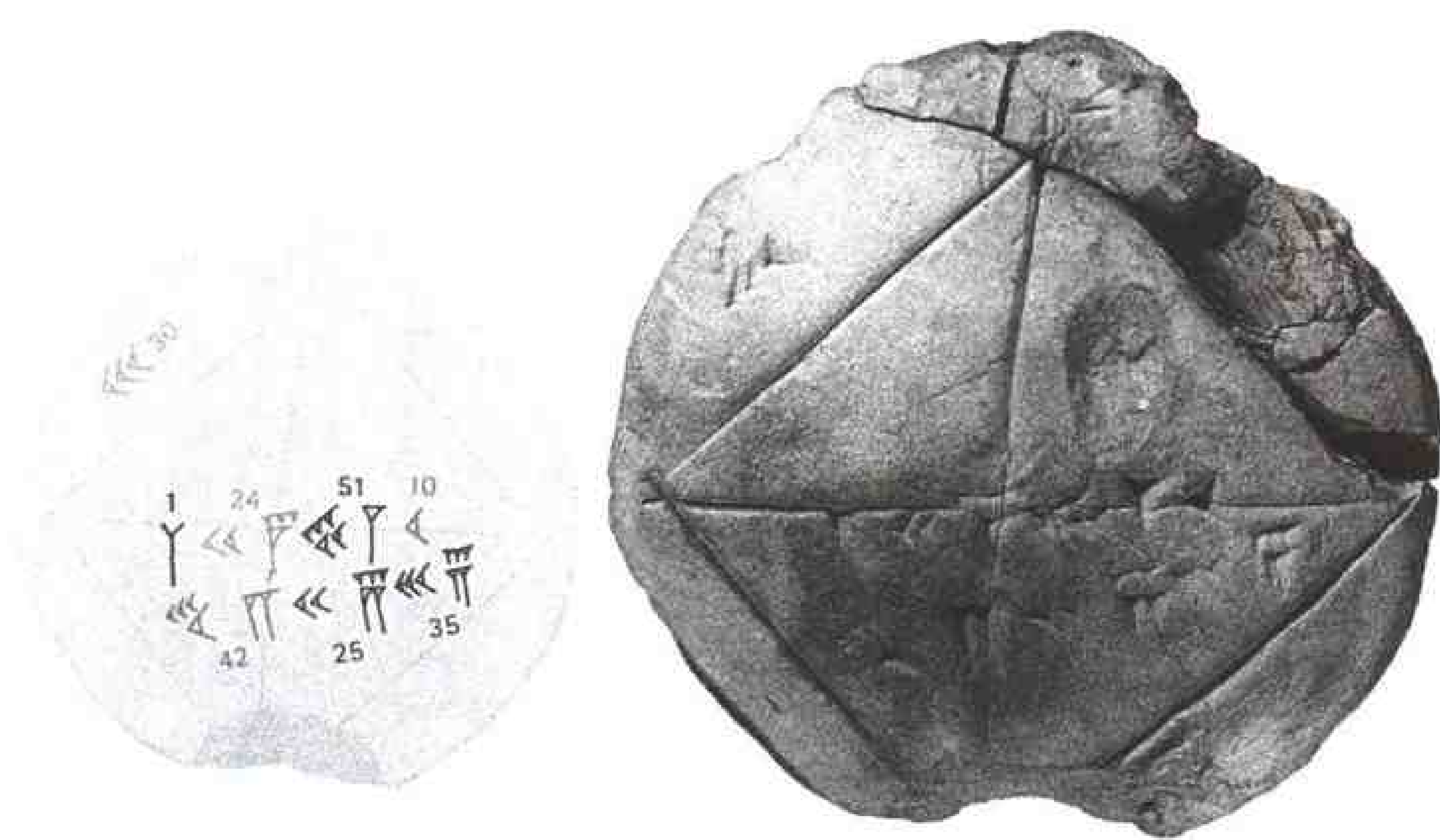
行政历法中一年被分为12个月，每个月又分为3个10天的“星期”。天狼星的偕日升（在隐没于太阳光辉中而看不见相当长一段时间之后首次出现于黎明的天空）则很久以来一直被用于调控宗教历法，除天狼星外，再加上35个星群或者说星座，它们的偕日升差不多每隔10天依次出现（正是因为这个原因我们才将它们称为“旬星”）。

假定在某个给定的夜晚，接近黎明时某个这样的旬星出现偕日升了，那么在这个夜晚，另外的那些旬星也曾按照正常的间隔次第升起。它们的升起有点像现代教堂的钟声，实际上就标志着时间的流逝。

总共有36旬星，但是地球大气层的存在，使得在太阳落山以后一段时间里天空仍然是亮的，而在太阳升起之前一段时间里天空已经告别黑暗[①]，这种效应缩短了黑暗的时间。其结果是，36旬星中用来表征夜晚的数目，就小于理论上的18，夏天时则更少。事实证明，用12旬星来为每个夜晚计时比较方便。冬天的夜晚，在开始前和结束后各被多分配一个“小时”，以便与一年中最长的夜间时刻相匹配。埃及人可能是根据类推，将白天的时间也分成了12份。

不幸的是，我们关于旬星的知识，主要来自少数棺材盖上的绘画，而人们不能指望在棺材盖上发现科学的、精确的文献。结果是，对我们来说，大部分旬星的定义是很不确定的。

① 这种效应在天文学术语中被称为“晨昏蒙影”。——译者注



一块巴比伦泥版（右侧），年代约为公元前1700年，以及与此相应的表。抄写员将铁笔在泥版上刃口向外侧刻画，表示1；而刃口平直刻画则表示10。数字不像我们用10进位，而是采用60进位。左侧左上角写的是30，下面沿着水平对角线，写的是42、25、35，或者说是$42+25/60+35/60^2$。如果这个数字被30除，我们得到$1+24/60+51/60^2+10/60^3$，转换成我们今天采用的记数法，就是1.414213，这正是2的平方根（精确到0.000001）。我们看到，抄写员知道正方形的对角线长度是边长乘以2的平方根，这是毕达哥拉斯定理的一个特例；而早在公元前1700年，这位巴比伦抄写员已经拥有将2的平方根之值计算到极高精度的算术技巧。

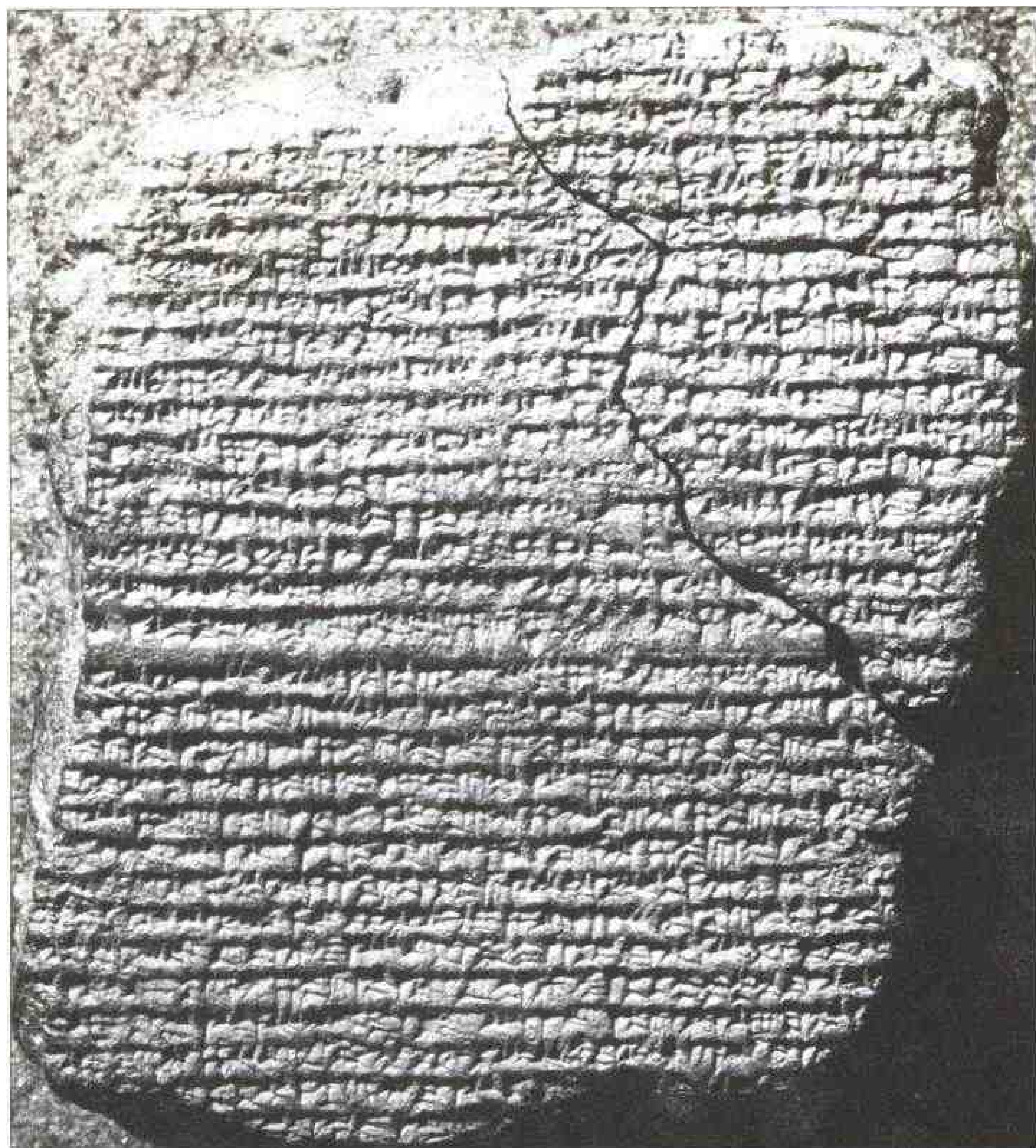
早期的巴比伦观天者经常被认为是星占学家，但是，如果将星占学理解为是对由天体位置结构对个人所造成的直接而不可避免的后果的研究，那就错了。巴比伦人对自然的各个方面的不寻常事件保持着警惕——他们检视绵羊的内脏就是这方面的例证之一，当他们发现不寻常事件时，他们将其解释为一个征兆：不是将要发生的灾祸的原因，而是对国王和民众发出的一个灾祸的预先警告；灾祸则有可能通过举行适当的仪式而得到避免。

这些解释是基于过去的经验，而这些经验甚至被编成了法典。在一系列的约七十个的表中，包含了7000个征兆，已知这些表都以Enuma Anu Enlil字样开头（即下文所说的“Enuma集合”——译者注）。这些星占征兆的集合，从公元前900年前开始就已经获得了权威地位，实际上被认为是诸神向国王传递的讯息，包括愉悦或不满。博学的抄写员能够根据在Enuma集合中相似的征兆讯息，来解释新的征兆，人们希望这些人提出的建议，能够有助于国王采取避免灾祸的措施。

在Enuma集合中最常被提到的天体是月亮；因为他们的历法是太阴历，月亮周期就显得更加重要了。历法在每个文明中都呈现为一个很大的挑战，因为日、月、年的自然长度是相互独立的：多少天构成一月，多少月构成一年，都没有简单的倍数关系。其结果，我们看看今天所使用的公历中月长度的混乱和复杂的闰年系统，就知道了。

因为回归年的长度稍长于12个朔望月，而稍短于13个朔望月，巴比伦人不得不一次又一次在正常年份中增加第13个“插入的”月。在很长时期内这种“插入的”月并无规律可循，但是大约在公元前5世纪，巴比伦的天文学家认识到，19个回归年非常接近于235个朔望月，因为$235=(19\times12)+7$，于是有了19年7闰的规则。

这个被称为“默东章”的19年7闰周期，很可能是在公元前8世纪，由Enuma集合的抄写员们在系统观测和记录天文（以及气象）现象的活动中发展起来的。他们的目的是增进他们预言的效率，但是他们努力的结果在天文学史上的贡献却是



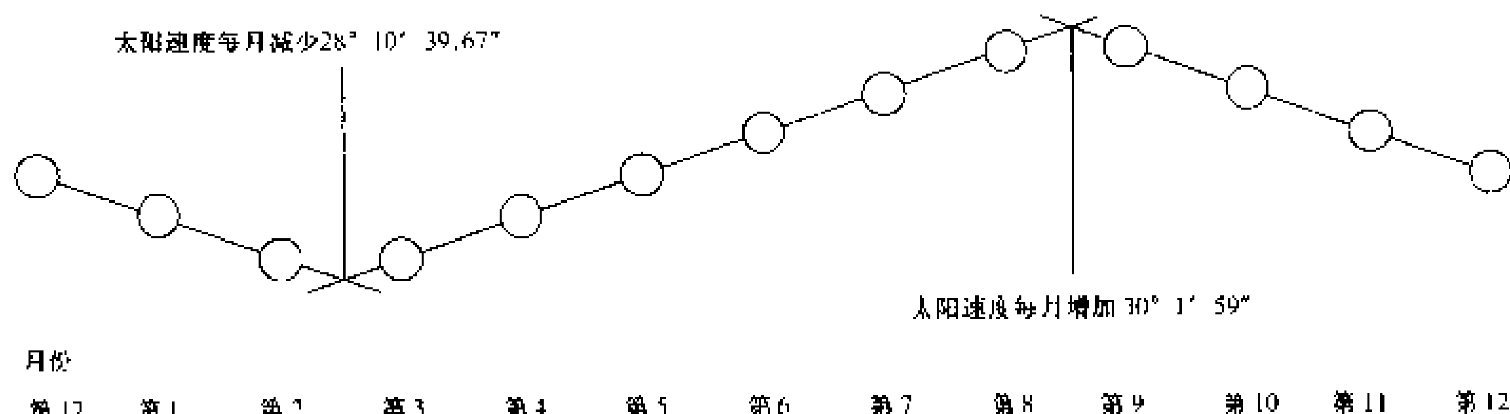
公元前164年，哈雷彗星临近地球，从是年9月至11月间，其位置非常宜于观测。图为两块记有哈雷彗星位置的巴比伦泥版之一，上面记载着从10月20日至11月18日期间哈雷彗星的位置，此时它在昴星团和金牛座区域。

难以估量的。记录持续了7个世纪，正如Enuma集合对凶兆的记录所显示的，这些凶兆的重复出现是如此频繁，以至于从宇宙秩序中找出了规则，于是太阳、月亮和诸行星运行的周期——也就是规则——逐渐被识别和确定了。

星占学家对于载有太阳、月亮和行星未来位置的表（即星历表）的需求，直到17世纪，一直是天体运动研究背后的驱动力。装备了星历表，星占学家就无论气候好坏都可以持续他的营生了。巴比伦的抄写员们已经学会了这一点，通过运用复杂的数值系统，他们得以充分利用他们的观测记录所揭示的各种周期（来进行推算）。

例如，太阳在恒星背景下的周年视运动，其速度是持续变化的，巴比伦人在描述这种运动的技术中显示了其方法的独创性。在半年中，太阳的速度持续增加，直到它达到一个最大值；随后，在其余的半年中，其速度逐渐慢了下来，直至达到一个最小值。

巴比伦人设计了两种办法来近似地表达这种运动。第一种，假定太阳视运动



巴比伦人对太阳周年视运动第二近似方案的现代表达，其中的数值见于公元前133－前132年的泥版。在6个连续的月份中，太阳被想象成匀加速运动；随后6个月中则变为匀减速运动。在该泥版中，即使每月的太阳视运动速度值没有全部一一给出，我们也能知道太阳每月的运行速度是在最大值28° 10′ 39.67″ $(28 + 10/60 + 39/60^2 + 40/60^3)$ 度和最小值30° 1′ 59″ 度之间做线性变动。

速度在半年中是一个固定值，而在其余半年中则是另一个固定值。第二种，也是更复杂的一种，假定太阳在半年内作匀加速运动，而在其余半年中作匀减速运动。显然，两者都不过是对太阳实际运动情形的人工近似；但是因为他们有效的数值系统，计算结果是直截了当的，而且效果足够好。

类似的技术也被用来描述月亮运动和五大行星的运动，这要求允许对泥版上的表进行特别复杂的编制。有些表保存至今，这些精心制作的泥版上有一栏栏数据，历史学家绞尽脑汁，设法揭示出这些数据背后潜藏着的结构。

这些巴比伦抄写员心目中究竟有没有宇宙的模型，我们并不知道。当他们的表传到用希腊语写作的天文学家手里时，则是关于时间与角距之间的算术关系。这正是希腊人从思辨玄想的宇宙学转向宇宙的几何模型时所需要的，利用这样的几何模型，可以计算出精度非常高的星历表。

希腊天文学：天球

希腊天文学家向他们自己提出的问题，以及他们用来回答问题的方法，都与我们从巴比伦泥版中所见到的大不相同。在表达新月何时发生这样一个历法问题时，巴比伦人的方法是用算术来研究各有关天体的特殊位置结构——地球、月亮和太阳处在一条直线上的时刻。这与希腊人形成了鲜明的对比，他们采用行星运动的几何模型[①]，致力于使得任何时刻观测到的行星位置都能够被该模型所表达。希腊哲学家们又要就表现行星运动的几何模型进行争辩了——例如，它是真实的？虚假的？还是可能的？或者仅仅是精确的或不精确的？但是，就我们所知，巴比伦天文学家会简单地以结果来判断——他们对天象预先推算的精确度，要么已经满足需求，要么未能满足。

我们知道的第一个宇宙学家来自繁荣的希腊殖民地爱奥尼亚。米利都的泰勒斯（Thales of Miletus，约公元前625－前547年），据说他传授这样的学说：被我们的感官所接受的自然界短暂纷繁的现象背后，有一个基质——他认定是水，所以自然比起那些表面上的无穷变化来说是更容易理解的。

阿那克西曼德（Anaximander，前公元前610－前545年），也是米利都的，他有一个关于世界如何不断地从无穷（Infinite）向存在变化——只是毁灭和被无

① 从古希腊到中世纪，欧洲人经常将太阳、月亮这两个天体也视为行星（planet）。这一点与中国古代的术语“七政”（日、月和五大行星）有异曲同工之妙。——译者注

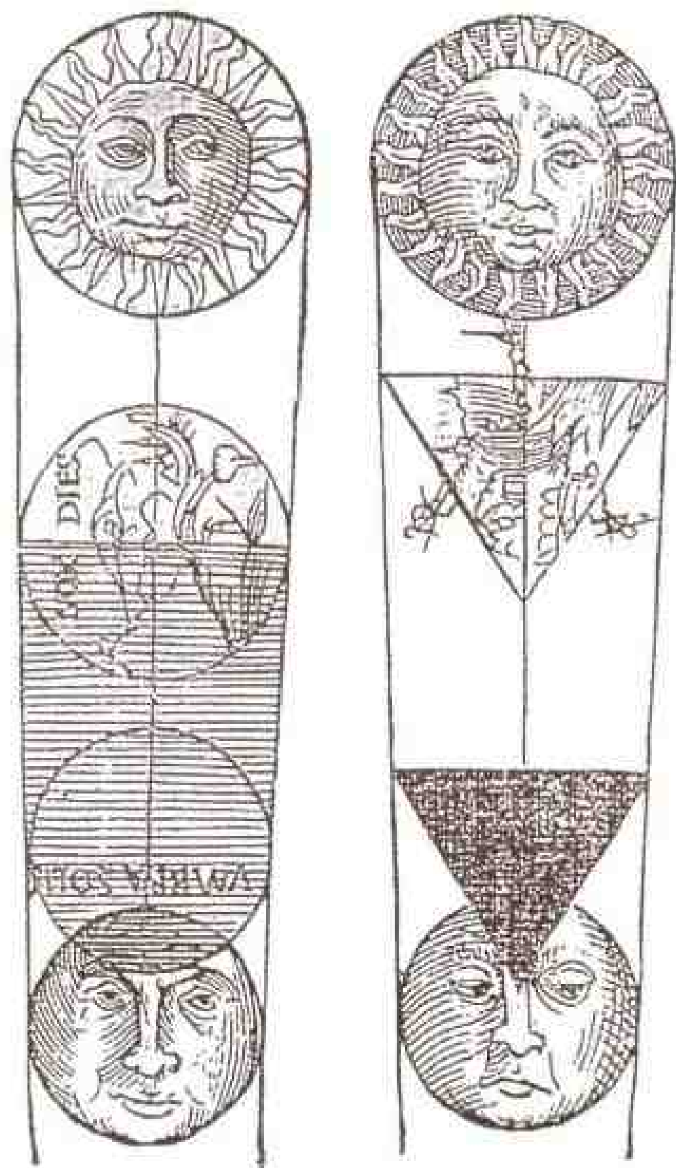
穷再次吸收——的学说，他试图在这个学说中解释天体的形成。如果我们能够信赖几个世纪后写下的文献，则他认为恒星是带火的车轮状的浓缩气体，并且有着能让光焰辐射出来的缺口。太阳是天上最高（因而也就是离我们最遥远的）的天体，其下是月亮，再下面是"固定的"恒星（它们相互之间的位置不会改变），最后是各行星。他相信大地是一个圆柱体，这圆柱体一端的表面生活着人类，这一端静止于宇宙的中部，因而与其余各处保持着同等距离。这一宇宙学说的局限性是显而易见的，但是一个基本的变化出现了：先前的神话被代之以一个自然，在这个自然中有一个非个人的法则在起作用。

在泰勒斯主张自然有一个基质之后不久，在南意大利的希腊殖民地中，一个宗教教派的成员们也主张自然结构的背后有统一性，他们视毕达哥拉斯（Pythagoras）为教派的创建者。后来的神秘传说模糊了他的个人成就；但一个有重要意义的传奇故事，说他在听铁匠打击铁砧发出的声音时，理解了算术比例与和谐音阶之间——也就是抽象数字与自然现象之间——的关系。可以肯定的是，毕达哥拉斯派由此推论而接受了数作为万物的基础。

同是这些毕达哥拉斯派的哲学家，对自然界达到了一个非凡的洞察：认识到大地是球形的。他们的论证未能被记录下来，但是他们所用的后来由亚里士多德给出的论据——月食时地球投在月面上的阴影总是球形的——是强有力的。为了确认这一结论，亚里士多德指出，当一个人向北或向南旅行时，他会看到不同的恒星，这表明大地事实上是一个不太大的球体。此后，从古代时期到中世纪文明，直到文艺复兴，无论是谁，也无论持何种教育主张，都知道大地是球形的。[1]

更一般地来说，毕达哥拉斯学派相信自然界是一个"和谐宇宙"（cosmos）。这个术语意味着一个理性的秩序，但言外之意还有对称和美丽的意思，以及存在于一个健康生物体中的和谐。当柏拉图（Plato）的著作被重新发现，从而使得毕达哥拉斯学派的思维方式再次流行起来时，这种"宇宙必定和谐"的直觉，成为文艺复兴时期天文学发展的强大驱动力。柏拉图曾访问过意大利南部，深受他在那里发现的毕达哥拉斯学派教义的影响。

柏拉图（公元前427－前348/7年）是雅典三大哲学家中的第二个，他在公元前5世纪晚期和公元前4世纪活动于雅典，并为这座城市增添了荣耀。他的老师苏格拉底（Socrates）没有什么著



16世纪的木刻，显示亚里士多德的论证：月食时地球投在月面上的阴影总是圆形的，这表明大地是球形的（如左侧图所绘）。如果大地是三角形的，那么月食时投在月面上的阴影也应该是三角形的（如右侧图所绘）

1 这只能就西方世界而言是如此，古代中国人对于大地的形状就有不同看法。——译者注

Meridies

b

Eclip citate lune

Umb' terre

c

a

Oriens

Roma

Parisius

Occidēs

¶. a. b. hore eclipsis lune ap̄ ciui
tatē orientaliorē ⁊ sūt. 6. hore
noctis. c. b. ore eclipsis lune
ciuitatis occidentalioꝛ ⁊ sūt
4. hore q̄ prius incipit no
p unā horā ap̄ orientalioꝛ
er h' minor tre ē.

ocul'
i sūmi
tate mal'.

sol

Ocul' nō uidēs.

Ocls uidēs.

ocls.

Rex uisa

述，但作为柏拉图许多对话中的人物而被后人所知。柏拉图的学生亚里士多德，是博物学家也是哲学家，则著作等身、流传至今的部分就卷帙浩繁；而且机缘凑巧，他的几乎所有传世著作到中世纪晚期都已经可以在大学中被用于教学（不像柏拉图的大部分对话），这就鼓励了一种对待自然的态度，即强调博物学家对于功能和目的的感觉。

左页绘图证明大地是球形的，一份13世纪的手稿中，在不同经度处的观测者，可以在不同的当地时间观测到同一次月食；在桅杆上的水手，可以看见在甲板上的水手看不见的岸上信号。

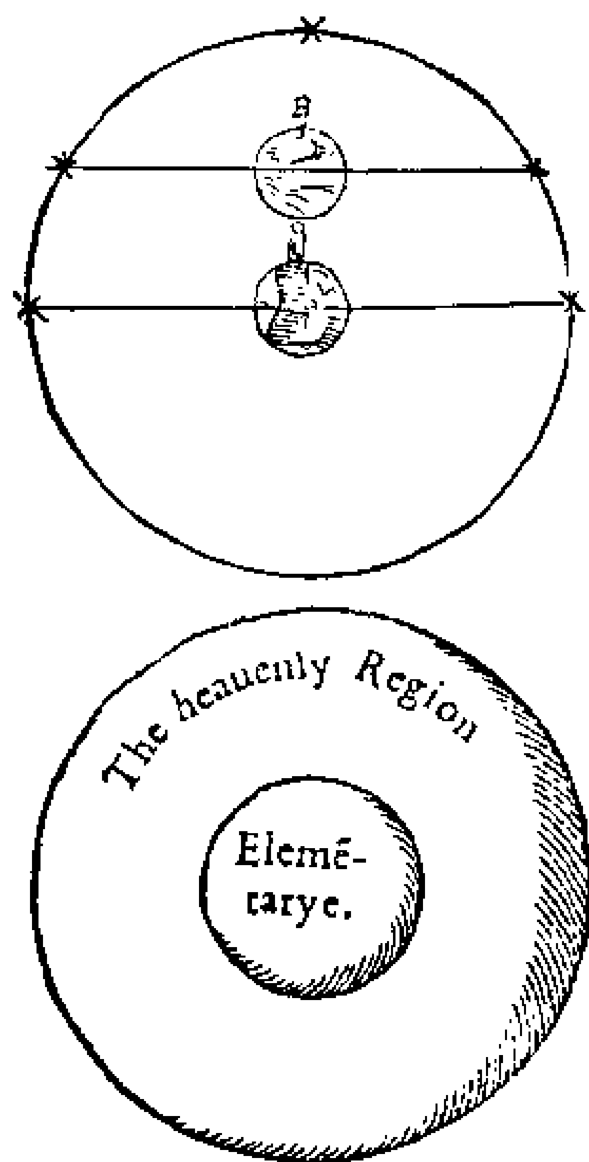
柏拉图不同于亚里士多德，他将注意力集中在基于数学推理的确定性上，对于晚近的文明，他描绘出自己对自然的数学观点：毕达哥拉斯学派的洞察，尽管舍弃了它们极端的神秘主义。但是柏拉图和亚里士多德都赞成，世界是一个“和谐宇宙”——宏观宇宙的一些部分，与生物个体的器官，或者说微观宇宙，有着对应关系。正是这种对应关系为星占学特别是星占医学（见本书66–67页）、提供了理论基础。

此前的哲学家在人类周围的环境中看到两对相反的基础性质：热和冷，湿和干。按照亚里士多德的意见，人体是冷的、大地是干的，水是冷而湿的，空气是热而湿的，火则是热而干的。地球（大致为球形）位于“和谐宇宙”的中心，围绕着地球的是一圈水（海洋），再外面是一圈空气（大气层），再往外是一圈火，其终端直达月亮轨道。

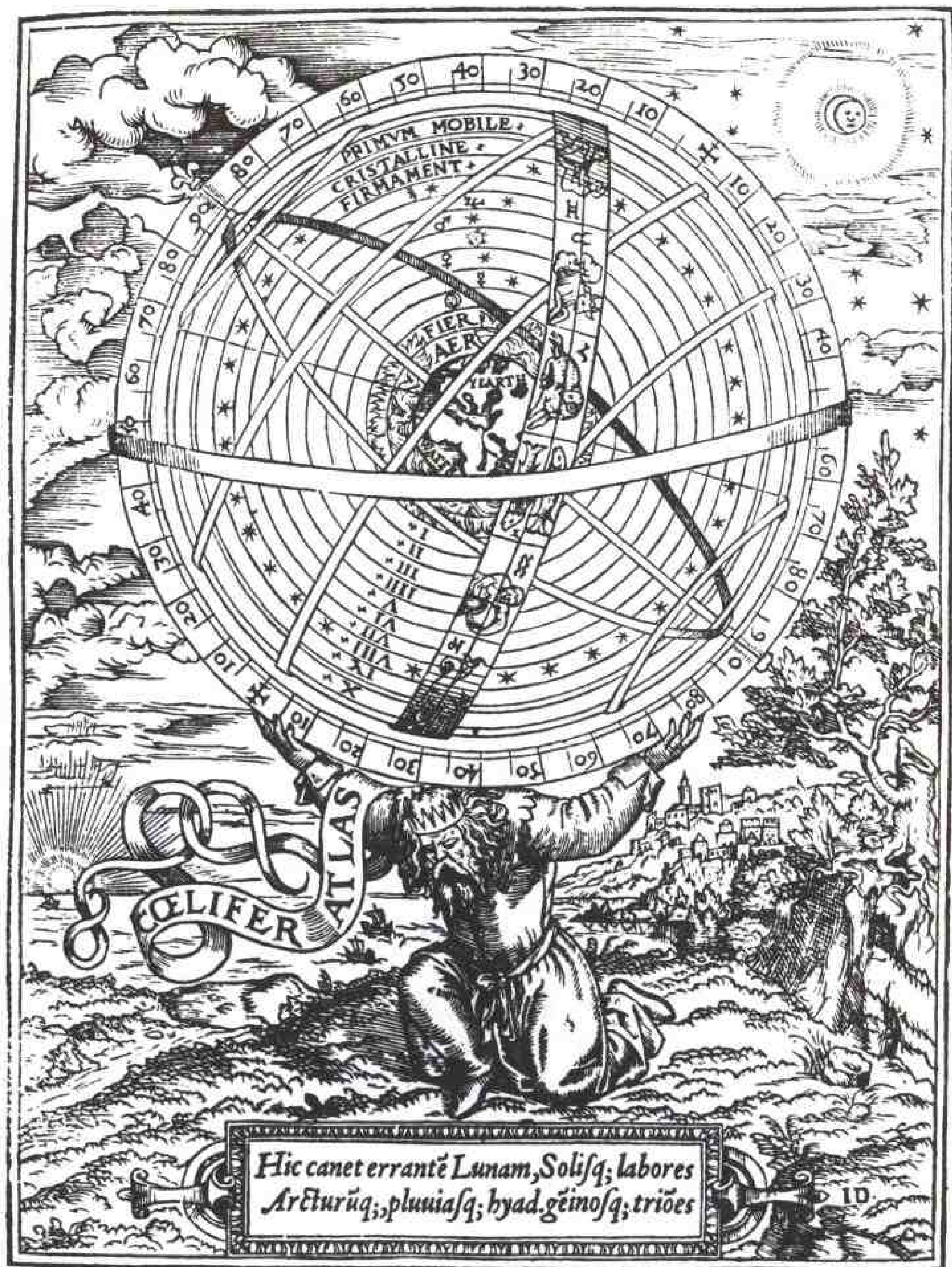
在上述区域——包括大地或称为月下世界——之中，是生命和死亡，它们变幻不居。任何给定的物体都有一个自然位置——自然的高度，或者说从地心算起的距离——取决于该物体中元素的比例与构成：除非受到阻止，物体总是倾向于向其自然位置运动。这就是石头为何向下坠落而火焰为何向上升腾的原因。这样的“自然”运动，我们注意到，总是沿着直线发生，不是朝向地心就是背离地心；而且这种运动是暂时的，当物体到达它的自然位置或接近环境所能允许的极限，运动就结束。

希腊人不仅同意大地是球形的，而且发现有强有力的证据表明，球形的大地在宇宙中心，而宇宙则被限制在一个巨大的球壳之内，这个球壳就是恒星所在之处。然而，为什么人们总是只能看到半个天球？

按照亚里士多德的解释，在地与天之间，在不精致、不持久的人类居所和有着点与圆形光线的、完美几何的、永恒不朽的天球之间，有一个基本的对比。在天，没有生命和死亡，没有将来与过去，有的是天体永恒的圆周运动；天体全都由纯净的第五元素（或者称为“精华”）构成，它们通过圆周运动的永恒来显示其本性的永恒。至于彗星，它们确实有来有往，但这并不构成理论上的困难：它们的行为显示出它们属于月下世界——事实上它们被推测为是由地球的蒸发物所形成的，亚里士



公元6世纪用雕版插图加以说明的亚里士多德的教诲。上部：因为我们能够看到的正好是半个天球，所以地球必然在宇宙的中心。下部：土、水、气、火四元素所在的大地或者说是月下区域，被永无变化的、由第五元素构成的天球所包围。



宇宙之图，绘于公元1559年。中心是土、水、气、火四元素，接着是各天体所在的天球层，其顺序是公元2世纪托勒密（Ptolemy）所确定的由内向外：月亮、水星、金星、太阳、火星、木星、土星、众恒星。恒星天球（也就是"天穹"）外面是两个附加的球层，这是中世纪根据神学理由而发明出来的（见本书72页）。图中也显示了黄道带、天球赤道和位于巨蟹座及摩羯座的南、北回归线，还有其它一些环。

多德在《气象学》（Meteorology）中讨论了它们。

重要的是要区分，亚里士多德宇宙学所依赖的，是得到常识支持的智慧表达，看起来像是不证自明的，而这与现代科学形成鲜明对比。例如，亚里士多德告诉我们，地球至少在我们脚下，我们是在"稳固的大地"之上；然而今天的天文学家却要我们相信，我们是以一个几乎难以想象的速度在空中疾驶[1]。亚里士多德肯定天与地之间有着基本的区别，然而哥白尼之后的天文学却坚持要我们抛开明白

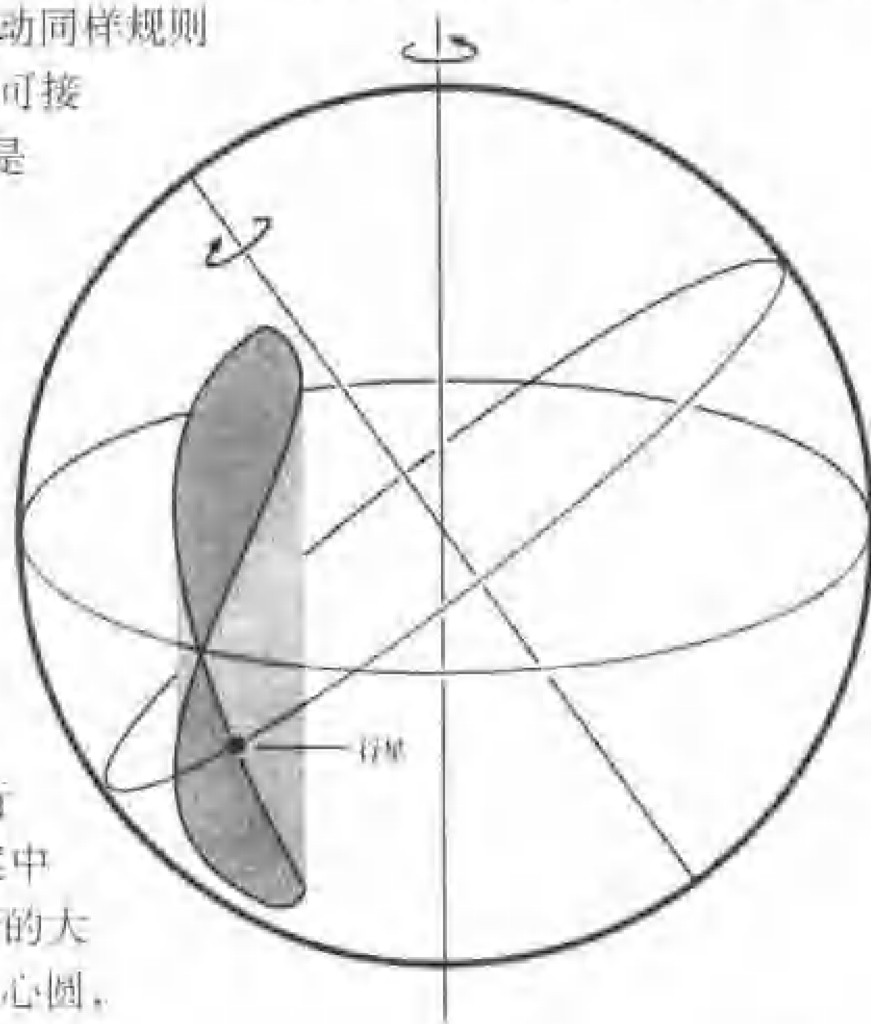
① 因为地球是悬浮在空中的，同时既有自转，又有公转，所谓"坐地日行八万里"，就是这个意思。——译者注

易懂的常识证据，接受地球是一个天体的概念，就像金星、火星以及别的行星一样。宇宙学的历史，并不是一个拒绝荒谬观念、接受明白易懂的（或稍经思考后能够明白的）真理的简单故事，而是一个来之不易的拒绝常识、接受“荒谬”的英雄传奇。正是这一点给了宇宙学的历史以迷人的魅力。

我们有一个从物理上来论证它的例子，即地球是静止的而不是绕着其轴旋转着的。这一论证对于几乎所有思考这一问题的人——从公元前4世纪的雅典哲学家，直到两千年后在汶岛天文台中的第谷·布拉赫（Tycho Brahe）——来说，似乎都是可信的，甚至到了今天也依然会被认为是振振有词的。比如，让一个射手垂直向空中射出一箭，如果在箭飞向空中的同时，地球连同站在原地的射手都在移动，那么当那枝箭从空中又垂直落下来时，应该不会落在射手原先站着的位置。然而实际情况显示，那枝箭事实上是落回射手原先所站的位置。因此得证：地球没有运动。[①]

但是，如果地球的静止没有受到怀疑，那么要使作为宇宙的天球中运行规律显得无懈可击，还需要证明“流浪之星”——也就是行星（planets）——的运动也是有规律可循和有规则的。除了7个例外，无数天体都有其合理的行为方式：相互之间的位置保持不变，众恒星以地球为中心，夜复一夜、年复一年，以完美的数学规则像车轮一般运转。但是这7个行星——太阳、月亮、水星、金星、火星、木星和土星——却在众恒星之间擅自移动，速度也各不相同，看起来显得稀奇古怪。事实上，一次又一次，其中5个较小的都会停留，并在正常向前运行之前，都会逆行一段时间。

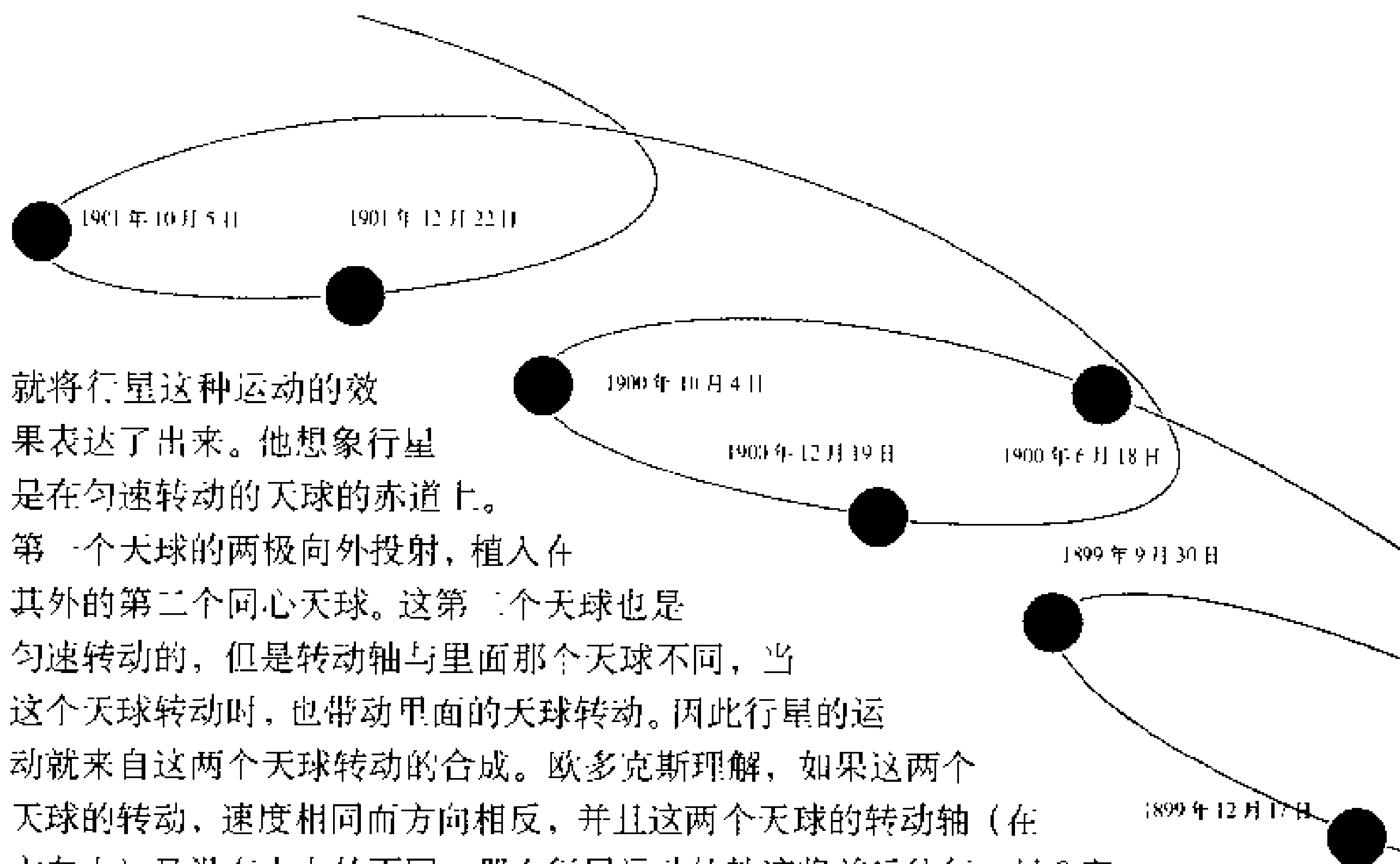
柏拉图（根据后来的评注者所说）曾对他同时代人的看法提出挑战，他认为行星运动事实上和其它天体的运动同样规则（尽管显然不是同样简单）。一个可接受的答案是清晰的：恒星的运动是匀速圆周运动，所以行星运动也必然在本质上是类似的；也就是说，我们所看见的行星运动是匀速圆周运动合成的结果。



一对欧多克斯天球所产生的马足形，行星位于转动轴倾斜的那个天球的赤道上，该天球的两极植入转动轴垂直的那个天球，并带动其旋转，这两个天球转速相同而转动方向相反，它们的运动合成的结果，行星就呈8字形运动（事实上是一个与两天球相交的圆柱形）。

于是欧多克斯（Eudoxus of Cnidus，约公元前400－前547年），一个柏拉图同时代的年轻人，也是古代最优秀的数学家之一，首次贡献了一套解决柏拉图挑战的方案。五大行星的逆行周期得到尽情表达，是这套方案中非一致性的极端例子，欧多克斯的大师手笔，是只简单地用了一对同心圆，

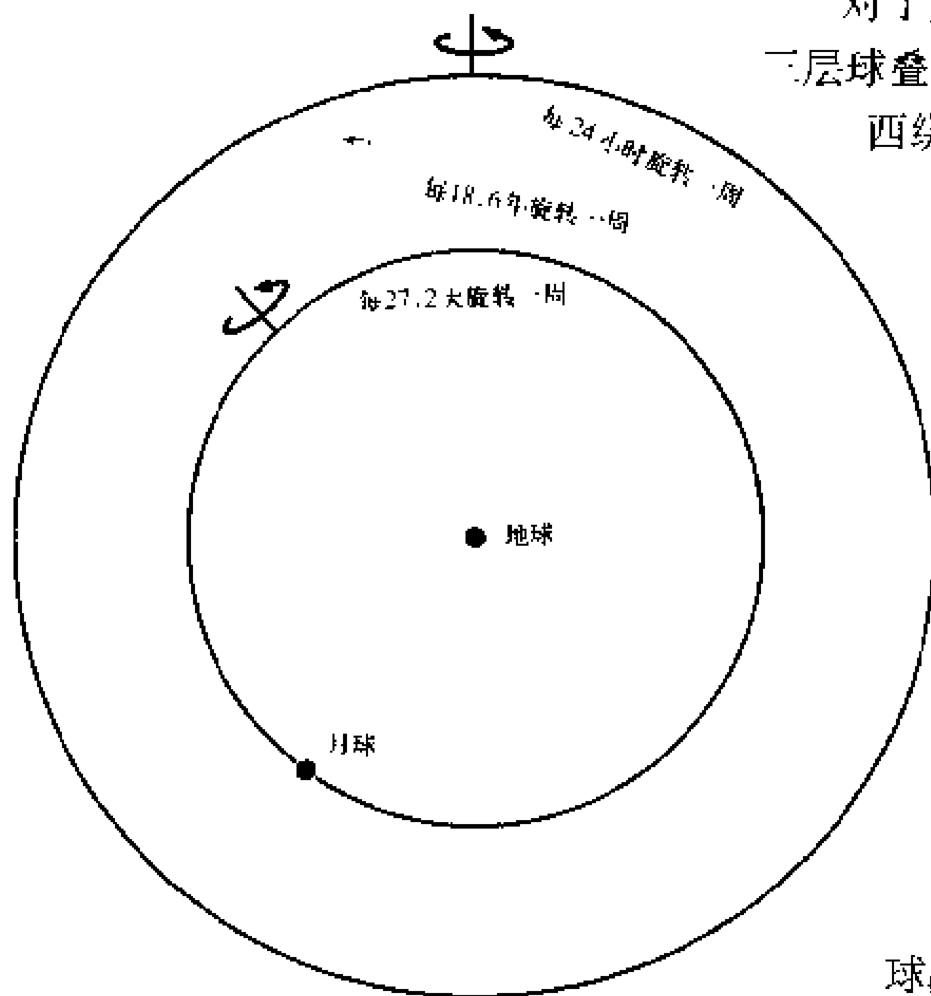
① 经过伽利略在运动学上的工作，人们当然已经知道这个论证是错误的，因为那枝箭在垂直向上的同时，还带有水平方向的运动，如果不考虑空气阻力，其水平方向运动的速度不会改变，而且将和地球表面的运动同步，所以它仍会落回原地。因此，这一现象并不能证明地球是静止的。——译者注



就将行星这种运动的效果表达了出来。他想象行星是在匀速转动的天球的赤道上。第一个天球的两极向外投射，植入在其外的第二个同心天球。这第二个天球也是匀速转动的，但是转动轴与里面那个天球不同，当这个天球转动时，也带动里面的天球转动。因此行星的运动就来自这两个天球转动的合成。欧多克斯理解，如果这两个天球的转动，速度相同而方向相反，并且这两个天球的转动轴（在方向上）又没有太大的不同，那么行星运动的轨迹将前后往复，呈8字形——即马足形，或者称为马鞍形拱。

根据欧多克斯的方案，五大行星中每一个的模型，其两层天球中的外侧那层的转动，是由更外面的第三层天球所带动的，这第三球层的转动速度，选择为该行星在黄道（即太阳周年视运动的轨道）上由西向东运行的平均速度；而这第三层天球的转动，又是由最外层的第四天球所带动，这最外层的天球提供行星绕着地球由东向西的视运动。第三、第四球层产生了行星的基本运动，而里面的两层天球则至少是定性地——如果不是定量的话——描述了行星有时候出现的逆行。

对于月亮运动，欧多克斯构造了一个三层球叠套的系统。最外层的产生由东向西绕着地球的周日视运动。另两个球层的转动速度，分别为一个月（从图中的数据看，应该是交点月——译者注）和根据交食记录得出的周期18.6年。其中的变量或者说“参数”，可以进行适当的选择，以便使这一模型得以成功地表达月亮的运动。然而，欧多克斯为太阳运动所构造的三层球叠套系统，却不那么令人满意。



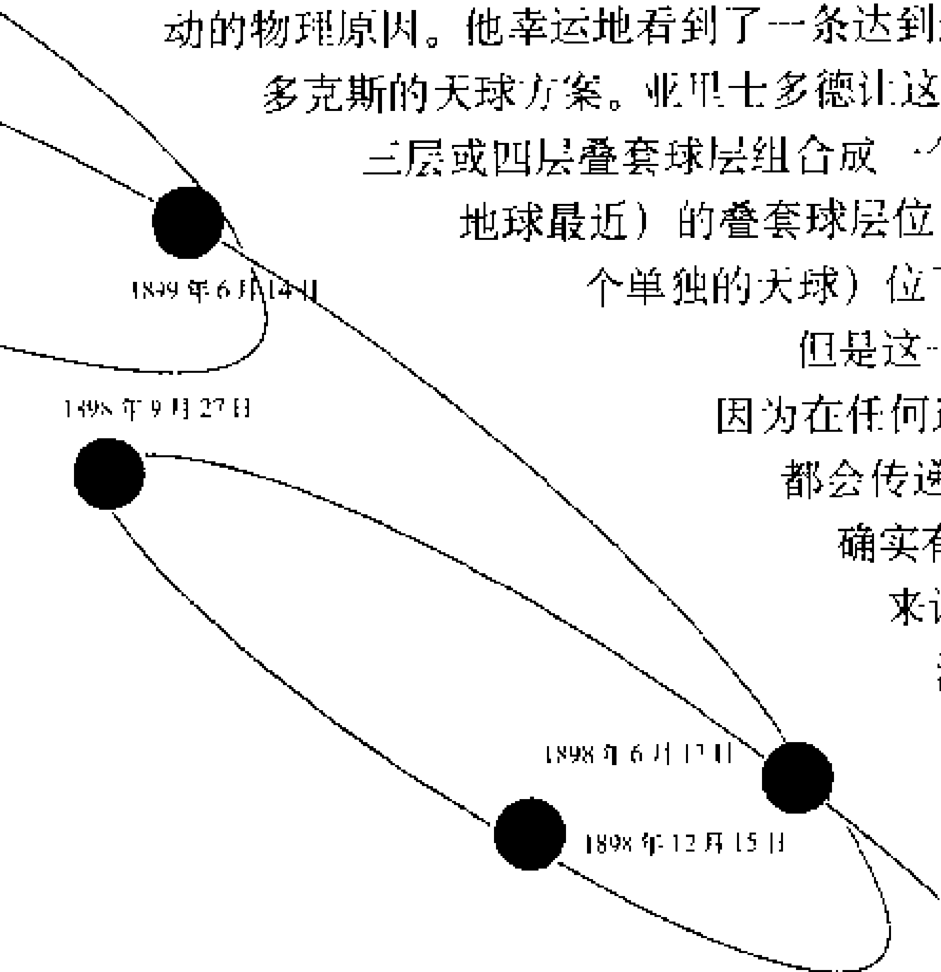
欧多克斯方案中的月亮运动。月亮位于最内球层的赤道上，每月旋转一周。内层天球的极轴植入中层天球，中层天球每18.6年旋转一周，这个周期与交食周期相似。中层天球的极轴植入外层天球，外层天球每天旋转一周。

五大行星，每个需要4个天球；太阳和月亮，各需要3个天球，

还有一层恒星天球，欧多克斯总共需要27个天球；其中8个天球——日、月、五大行星和恒星各一个——只是简单地提供相应的周日运动，所以总的来说，欧多克斯方案的复杂性远不过分。

没有人告诉我们，对于他这些天球的情形，欧多克斯自己如何看，但是很可能只是对这些行星运动问题的数学解。它们和描述这些天体如何运动是等价的。当然有进一步精致化的需要——比欧多克斯更年轻的同时代人卡里普斯（Callippus），给出了一个靠增加天球数目而获得更大适应性的系统——但是欧多克斯的方案，提供了一个理性的基础，使人相信世界确实是一个和谐宇宙，其法则甚至在日、月和五大行星中也适用。这一点正是柏拉图——他自己也是一个数学家——所呼唤的。

但是亚里士多德是一个生活在现实世界的自然主义者，他坚持要知道天球运动的物理原因。他幸运地看到了一条达到这一目的的捷径，那就是适当地采用欧多克斯的天球方案。亚里士多德让这些球成为物理上的实体，并且将不同的三层或四层叠套球层组合成一个完整的体系，让月亮（离天体被认为离地球最近）的叠套球层位于最内层，让恒星天层（准确地说是一个单独的天球）位于最外层。



从地球上所见海王星在众恒星间的轨迹（垂直方向有所夸张），时间在20世纪初。因为海王星绕太阳公转一周约需165年，所以地球每隔1年又2天就会追上它一次（即海王星的会合周期为367.5天——译者注），而在这个时候，从地球上看起来，海王星正在向反方向运行（即所谓"逆行"）。海王星太暗淡，用肉眼看不到，所以古代的人们并不知道它，但它的逆行（尽管远不是那么显著）和其余赢得了"流浪之星"的行星一样。

但是这一系统建立起来后并不能完全令人满意，因为在任何这样的实体球层系统中，每个球的运动都会传递给系统从而使得每一个球都受到作用。确实有一个运动——周日旋转——对每个天体来说都是共同的，所以亚里士多德能够取消除了最外层的那个之外的所有提供24小时周日运动的球层，对于提供日、月和五大行星的周日运动来说，最外层的天球就已经足够。但是大部分球形运动是专为每个行星而设计的。亚里士多德于是在欧多克斯方案所给出的各行星的叠套球层之间插入了适当的新球层。每个新插入的球层，与原来该行星的叠套球层（的外层）同轴同速旋转，但是方向相反，其功能就是抵消原来该行星叠套球层外层的旋转，使之不向下一个行星叠套球层传递。

这些插入的球层只是达到了表现物理功能的目的。它们尽管增加了系统名义上的球层数，但并不增加数学上的复杂性。亚里士多德的连贯的同心球系统，每个球以匀角速度旋转，成为中世纪后期被传授的自然哲学的基石；他的宇宙概念的富有吸引力的简洁性，与后来某些数理天文学家所发展起来的宇宙几何模型的令人畏惧的复杂性，形成了鲜明对比。

另一方面，这些数理天文学家，无论从数学概念还是从物理实在的角度，都看到了同心球体系的严重缺陷：那些球层不能提供天文学家所需要的适应性。特别是，增加球层对反映行星与地球中心之间的距离变化未能有所帮助。有些行星的亮度有变化，这强烈提示着它们与地球的距离存在变化；而太阳和月亮的目视尺度事实上也有变化，这也表明它们确实存在着距离变化。

希腊化天文学：两个传统的意义

在导致了希腊文化向近东传播的亚历山大大帝远征之后，定量地考察就显得更为迫切了。亚历山大的远征，使得思辨的希腊几何天文学，与巴比伦注重国家事务的、以观测为基础的算术天文学发生了接触。有少数来自“希腊化时期”早

阿利斯塔克：地球的运动

阿利斯塔克（Aristarchus，约公元前310－前230年）生于靠近小亚细亚海岸但当时还不太为人所知的萨摩斯岛（Samos）。当时已有不少关于地球是在运动着的思考。根据一个传统，费劳洛斯（Philolaus），一个生活于公元前5世纪下半叶南意大利的毕达哥拉斯学派的哲学家，主张地球，连同一个“反地球”（anti-Earth），以及太阳、月亮、五大行星，都围绕着一个“中央火”（central fire）——被认为是“宇宙之心”——而旋转。另一个传统告诉我们，叙拉古的西塞塔斯（Hicetas of Syracuse），费劳洛斯的同时代人，相信地球是绕着自己的轴在旋转的；柏拉图的学生，本都的赫拉克利特（Heraclides of Pontus，约公元前390－前339年以后）也持同样主张。而阿利斯塔克，这位古代的哥白尼，主张地球是在绕着太阳的轨道上旋转。根据阿基米德（Archimedes，约公元前287－前212年）记述，“他的假设是：太阳和恒星是固定的，而地球则运行于环绕太阳的圆形轨道上，地球位于这轨道的中部……”

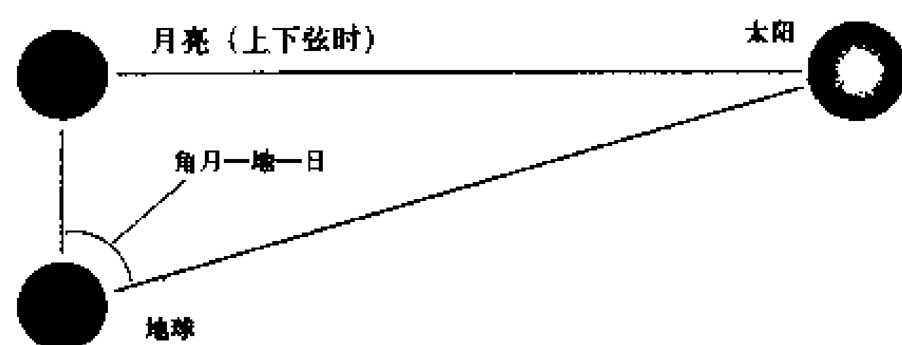
但是，如果地球上的观测者是在一个移动的平台上观测恒星，为什么看不到恒星的移动（这反映了地球的运动）？原因是，阿利斯塔克假定（就像哥白尼后来所坚持的那样），地球轨道的半径与地球和恒星之间的距离相比是微不足道的，因此地球的运动对于天文学家的观测来说是太微小了。

我们知道只有一个人被阿利斯塔克的思辨所说服，那是巴比伦人塞琉西亚的塞琉古（Seleucus），他生活于公元前2世纪中期，他试图证明阿利斯塔克的假设是真实的。此举缺乏支持是不足为奇的，阿利斯塔克的假设，毕竟只有用现代眼光来看才是可以理解的，它属于一个思辨宇宙学的传统，而这个传统将要让位于一种新的天文学，这种天文学致力于定量观测，并且全神贯注于设计可以复现这些观测的几何模型。

尼古拉·哥白尼（Nicholas Copernicus）《天体运行论》（*De revolutionibus*，1543）一页手稿中的一部分，这里他论证了地球是一颗行星并且是在绕着太阳的轨道上运行的。在手稿中他写道：“费劳洛斯相信地球的运动，有些人甚至说萨摩斯的阿利斯塔克也持同样观点。”但是在最后他宣布取消整个这一页，也许是因为这有点笨拙地离题。在删出的句子中，哥白尼对阿利斯塔克的信念没有给出明确的信息。

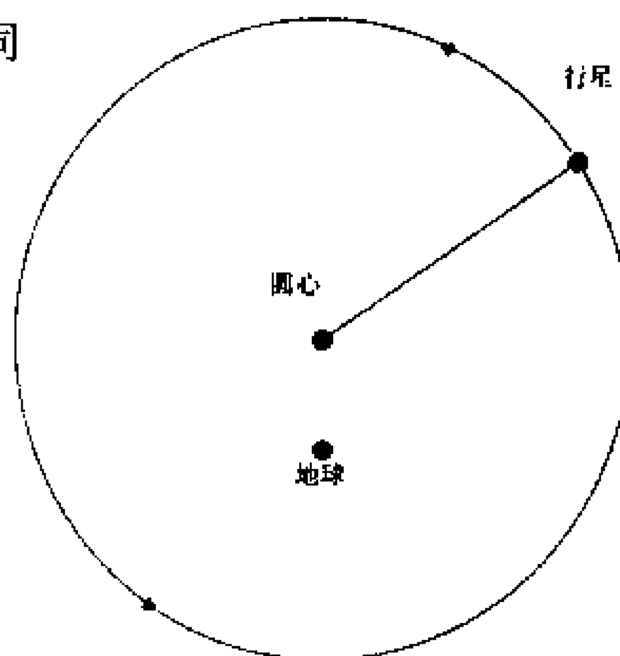
阿利斯塔克与日、月距离

在他现存的惟一论文中，阿利斯塔克正确地显示了（至少在原则上），我们如何能够计算出月亮和太阳的相对距离。当月亮正好半圆时（上弦或下弦），由月亮、地球、太阳组成的三角形将是一个直角三角形。如果我们此时测量出角月—地—日之值，就能知道上述三角形的形状，因而也就能够知道任意两边之比。



事实上，月亮上下弦的时刻是很难精确确定的，要测量出一个真正的直角和角月—地—日之值的微小差别也是非常困难的。阿利斯塔克取该值为3°，而实际值只有该值的1/18（即10′——译者注）。结果是，他算出地—日距离为地—月距离的约19倍，而这一倍数连实际上的1/20都不到。但他的论文是运用纯数学的典范，就展示其方法而言，3°之值也不算太离谱。

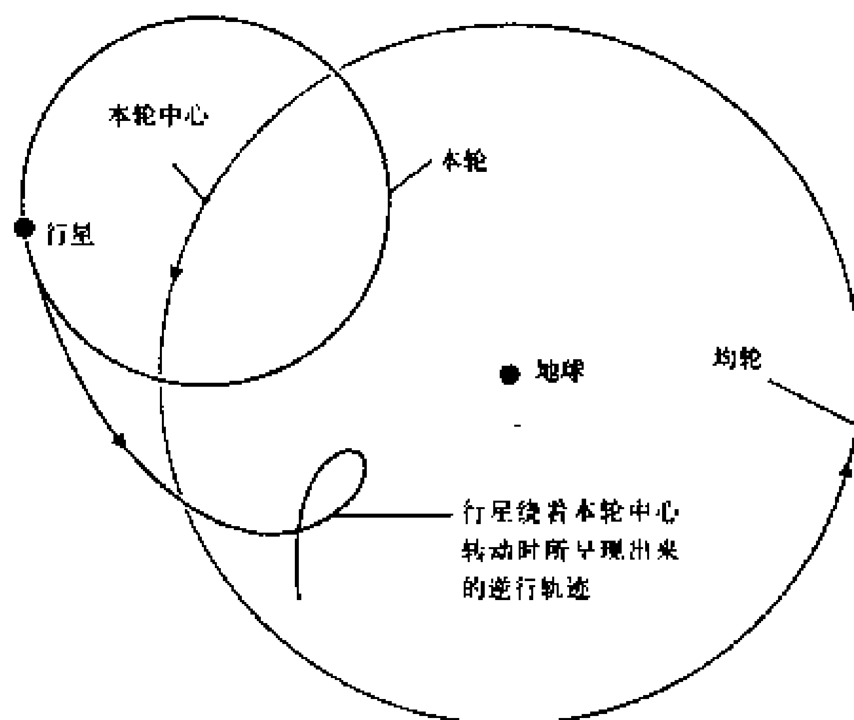
期的天文学著作被保留了下来；但我们无需什么著作来告诉我们，为何欧多克斯们的模型，连同它们所有几何上的典雅，对于那些从巴比伦人那里学到了十分重要的定量观测的天文学家来说却是无法接受的。



在一个偏心圆上，行星依旧作匀速圆周运动；但是因为地球不在圆心位置，所以从地球上看起来，行星的速度就会有变化（在途经圆周顶部时较慢，而在经过圆周底部时则较快）。

另一方面，认为匀速圆周运动是破解和谐宇宙秘密之钥的信念在希腊人的心中依然很强烈。前进的方向是保持对圆周运动的信念，但是要引入更有适应性的方式和那些来自巴比伦或从巴比伦的观测中计算而得的参数。

发展了圆周运动更有适应性形式的人，是佩尔吉的阿波罗尼乌斯（Apollonius of Perga），他因对圆锥曲线几何学的掌握而著称。关于他的生平我们所知甚少；他主要活动于公元前200年左右，曾在亚历山大里亚（Alexandria）生活过一段时间。在他用于天文学的第一个几何设计中，行星绕地球作匀速圆周运动；然而地球并不处在圆周的中心，而是偏向一边。于是，行星运行在这样的偏心圆上，它们与地球的距离以及从地球上看起来的视速度，就都会发生改变。



如何利用本轮解释行星运动的逆行。地球被假定位于大圆即均轮的中心，小的圆即本轮在其上转动，本轮又携带着行星转动。本轮和均轮皆以匀速转动。图中显示一个行星的逆行是如何产生出来的。

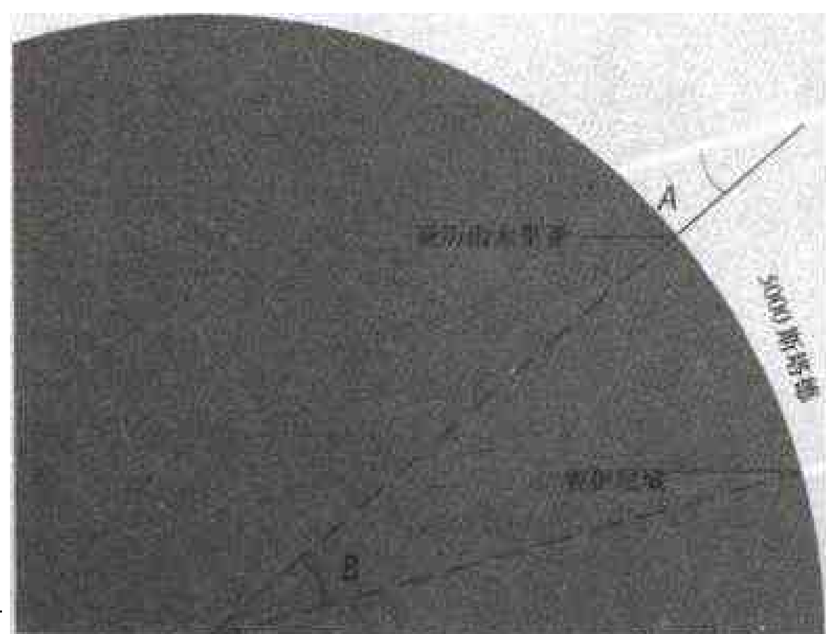
在第二个设计中，行星在一个较小的圆周或称为“本轮”（epicycle）上匀速转动，而本轮的中心则在另一个大轮——称为“均

埃拉托色尼和地球的尺度

埃拉托色尼（Eratosthenes，约公元前276－前195年）生于昔兰尼（Cyrene，在今利比亚），在雅典学习之后，一直在亚历山大里亚生活，他在那里负责作为博物馆一部分的著名的图书馆。他在数学和地理学的几个分支方面都很杰出，主持了一次著名的对地球尺度的估算。

一个夏至日的中午，在上埃及的赛伊尼（Syene）城，太阳正位于当地天顶：一个垂直竖立的指示器刚好没有影子，阳光射进一个专门为此而挖好的井的井底。与此同时，埃拉托色尼在亚历山大里亚测量阳光对垂直指示器投下的影子，发现其倾角是圆周的1/50。确信亚历山大里亚是在赛伊尼城北面5000斯塔德（stade，古希腊长度单位），埃拉托色尼得出结论，地球的周长（严格地说是地球上大圆的周长——译者注）是5000斯塔德的50倍，或者说250，000斯塔德。

尽管埃拉托色尼使用的数据并不十分准确，250，000斯塔德的现代对应值也有争议——有人认为相当于29，000英里，但是毫无疑问，埃拉托色尼所得地球周长之值与25，000英里的现代值之间的吻合是不错的，也许是非常好的。



埃拉托色尼由测量得知，角A为圆周的1/50，因为角A等于角B，他算出地球圆周为5000斯塔德的50倍，即250，000斯塔德。

轮”（deferent）——上被携带着匀速运转，地球位于均轮的中心。行星在本轮上的运动，如果相对于本轮在均轮上的运动是足够快的话，行星就将出现逆行。不难看出，从数学上（和观测上）来看，行星在偏心圆上的运动，等价于它由本轮、均轮所产生的运动的一个特殊情形；这有朝一日将引导出一个哲学问题：如果观测结果相同，如何确定这两个模型中的哪一个是“真实的”？

事后来看，本轮和均轮的引入，使希腊天文学走上了康庄大道。因为事实上水星、金星、火星、木星和土星都绕着太阳转动（在一个近似为圆形的椭圆上），而太阳看起来又是绕着地球转动（也在一个近似为圆形的椭圆上），本轮和均轮这两个圆的组合（都起着一个近似为圆形的椭圆的作用），对这五大行星运动的观测，可以提供一个令人鼓舞的一级近似。

由于这些行星轨道不是正圆形，因此本轮和均轮的组合，并不能真正完美地产生实际观测到的行星运动。天文学家——不管是古代的、中世纪的或是文艺复兴时期的——只要局限于圆周运动，哪怕竭尽全力，也不可能真正弥合理论预测与实际运行之间的差异。这个努力被一直持续下去。直到17世纪第谷·布拉赫

(Tycho Brahe) 才达到了前所未有的观测精度，迫使他的助手和继任人约翰内斯·开普勒 (Johannes Kepler) 放弃了圆周轨道而尝试采用其他方案。

阿波罗尼乌斯设计方案的使用情况我们几乎一无所知，因为有关他的天文工作资料已经佚失。除了希帕恰斯 (Hipparchus)，其他人的工作也是如此。希帕恰斯死于公元前127年之后。对于现代历史学家来说，幸运的是，托勒密大量引用了希帕恰斯的工作，并且乐于承认自己对先贤遗产的继承。从托勒密的集大成著作《至大论》(Almagest) 中，我们可以重建希帕恰斯关于太阳运动的模型（托勒密基本上未加改动地引用了），以及他的更为复杂的月亮运动模型（托勒密对此做了改进并使之精致化）。至于五大行星的运动，希帕恰斯将它留给后人去处理。

正是通过希帕恰斯的月亮运动模型，我们开始体验发生在希腊天文学中的异乎寻常的改变，这种改变吸收整合了巴比伦人几个世纪以来所提供的观测事实。在这个模型中，月亮运行于它的本轮，而本轮又绕着地球在一个均轮上转动。模型中的参数，由希帕恰斯根据我们在巴比伦天文表中发现的交食记录和相互关系计算出来。

有些数据显示了他所掌握的令人敬畏的技巧。他令每126,007天加1小时，这正好是4,267个朔望月（连续两次太阳、月亮位于相同黄经，这期间的时间间隔），又是4,573个月亮恢复到同样速度的周期（即近点月——译者注），同时还是4,612个月亮回到黄道上同一位置（小于7.5°）的周期（即恒星月——译者注）。欧多克斯和他的时代才刚刚过了200年稍多一点，希帕恰斯就达到如此境界，真令人难以置信。

在希帕恰斯和托勒密之间的三个世纪，是天文学上的黑暗年代，一个我们几乎一无所知的时期。我们对此甚至还没有对那些目标有限、性质又极度保守的天

希帕恰斯

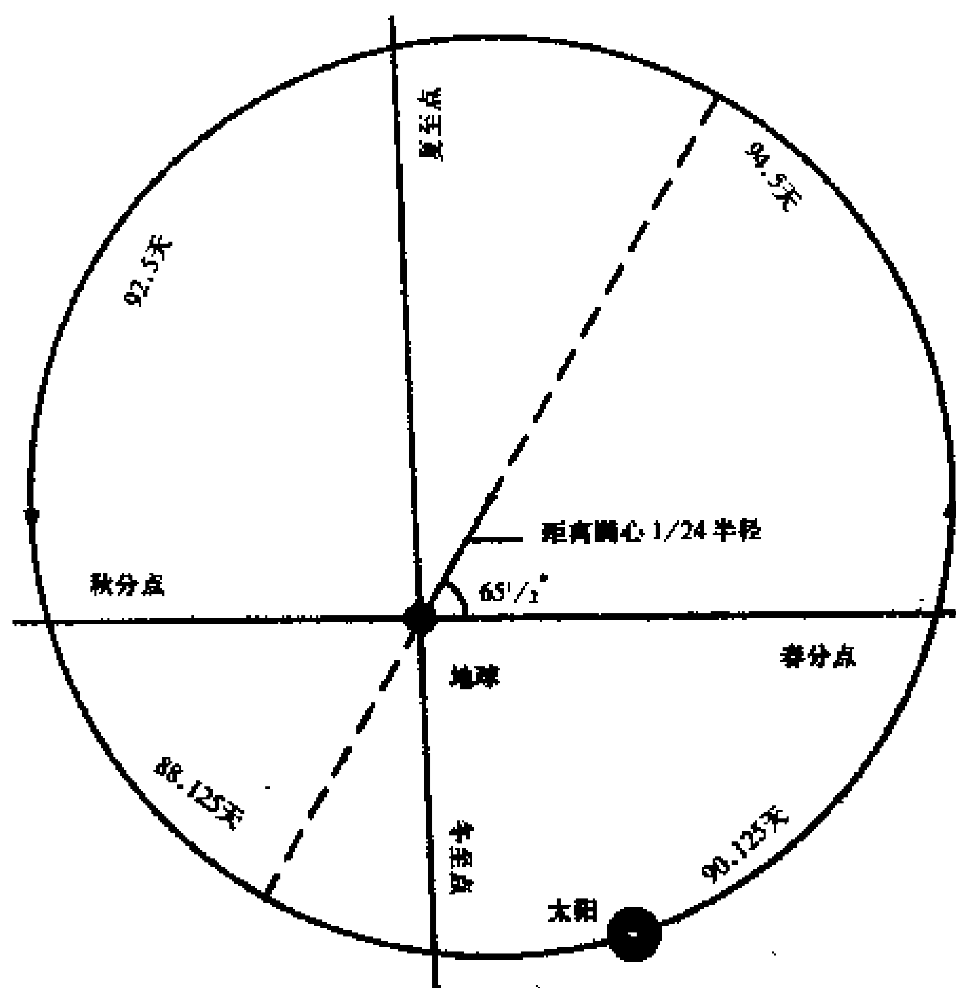
希帕恰斯出生于中亚西北部的尼西亚 (Nicaea)，他的被托勒密引用的观测数据，是他公元前141－前127年间在罗得岛 (Rhodes) 所测。除此之外，我们对他的生平几乎一无所知，除了极个别的例外，他的著作都已佚失。我们对他天文学成就的绝大部分知识，来自托勒密在《至大论》中的大量引用。

希帕恰斯是一个系统的观测者，他编制了一个恒星星表，这看来是因为他猜测这些恒星中有一颗可能有移动，他希望给他的后继者留下数据，以便用来检验恒星未来可能发生的移动。他也首次向我们显示，形成鲜明对比的巴比伦传统和希腊传统的结合，在天文学上能够如何惊人地富有成果。他运用来自巴比伦的天文学记录和参数，来改进关于太阳和月亮的定量的几何模型。

希帕恰斯最重要的独立发现，是春分点岁差，即春分点（天球赤道与太阳周年运动的轨道——也就是黄道——的交点）在众恒星之间慢慢从东向西移动。岁差实际上来源于地球自转轴的摆动。春分点被天文学家用作定义天球结构的参考点，岁差的发现表明这个点事实上是在持续移动着的，因此测量出来的恒星位置，实际上是随着观测年代的变化而变化的。据托勒密说，希帕恰斯认为岁差之值是每100年变化1°（实际上是约每70年变化1°）。

希帕恰斯的太阳运动模型

希帕恰斯精致而简单的太阳运动模型，对托勒密来说已经足够有效，以至于他不加改进就引用了，所以它得以流传至今。在这个模型中，太阳绕着地球在一个圆周轨道上旋转，对这个圆周轨道的圆心而言，旋转是匀角速度的，环绕一周要365.25天。但是希帕恰斯知道一年中四季的时间长度是不相等的，特别是，从地球上看，太阳在黄道上运行从春分点运行到夏至点的90°需要94.5天，而从夏至点运行到秋分点的90°，则是92.5天。因为这两段时间间隔，都长于365.25天的四分之一，这表明太阳在空中运行的速度并非恒定，而是有变化的。



因此地球就不能位于太阳圆周轨道的中心，而必须是"偏心"。但是偏多远？向什么方向偏？既然上面所说的两个时间段都长于365.25天的四分之一，地球显然只能向与这两个时间段对应的相反方向偏，才能使太阳在这两个时间段所对应的圆弧上运行的时间都大于其运行一周的四分之一。希帕恰斯的计算表明，应该偏离太阳圆周轨道半径的1/24，地球与太阳圆周轨道圆心的连线，与地球与春分点的连线之间，应该有65.5°的夹角。

采用了这些参数，这一模型就完全确定了。幸运的是，它用来描述另外两个季节也足够好，所以这个单一偏心圆的模型就足以反映太阳的周年视运动。

文学——比如印度所使用的天文学——知道得多，那些印度天文学著作用梵语流传下来，里面还有起源时代的希腊天文学成分。但是对于托勒密，历史学家至少可以无忧无虑，因为他的著作被后代所珍视，他撰写的大部分著作都得以保存至今。

托勒密写了一本集大成的星占学著作《四书》(Tetrabiblos)，他研究天文学，一定程度上是被需要所激发，他和同行的星占学家一样，需要足够精确而又无需繁重计算的行星位置表。他从阿波罗尼乌斯和希帕恰斯那里继承了偏心圆、本轮和均轮技巧。但他发现，为了准确而方便地计算行星的位置，他需要采用另一项设计——"对点"(punctum aequans, or equant point)。

假定地球位于离开一个给定圆周之圆心有一定距离的点上，托勒密定义"对点"为地球位置的镜像，位于上述圆心的另一边，该点与圆心的距离和地球与圆心的距离相等。然后他用这个点来定义圆周上的运动。圆周上的点不是以匀速运动，而是以变速运动，速度变化的规律是，让一个在"对点"上的观测者看来是匀速的。因此，"对点"的设置是对几个世纪以来认为天体运动必是匀速圆周运动的原则的冒犯。毫无疑问，托勒密考虑得更多的是精确和数学上的便利，而不是真实与否的问题。

然而，时间将会显示，托勒密发明了一个有着重大哲学张力的点，"对点"曾

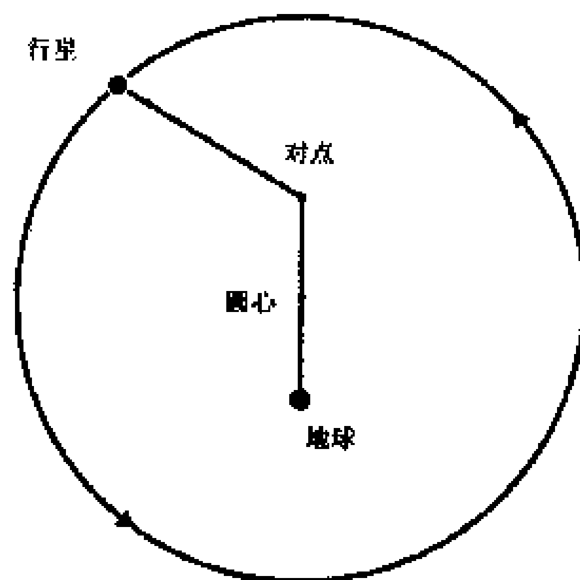
托勒密

对于托勒密的生平我们所知甚少。他在《至大论》中所报告的天文观测，年代从公元127年到141年，因此他的出生不可能比公元2世纪的开始晚得太多，他在《至大论》之后又写过几种重要著作，因此他的去世大约在公元165－170年之间。他给出的惟一观测地点是亚历山大里亚，故很可能他的全部成年生活都是在这个希腊化文明的伟大中心度过的。

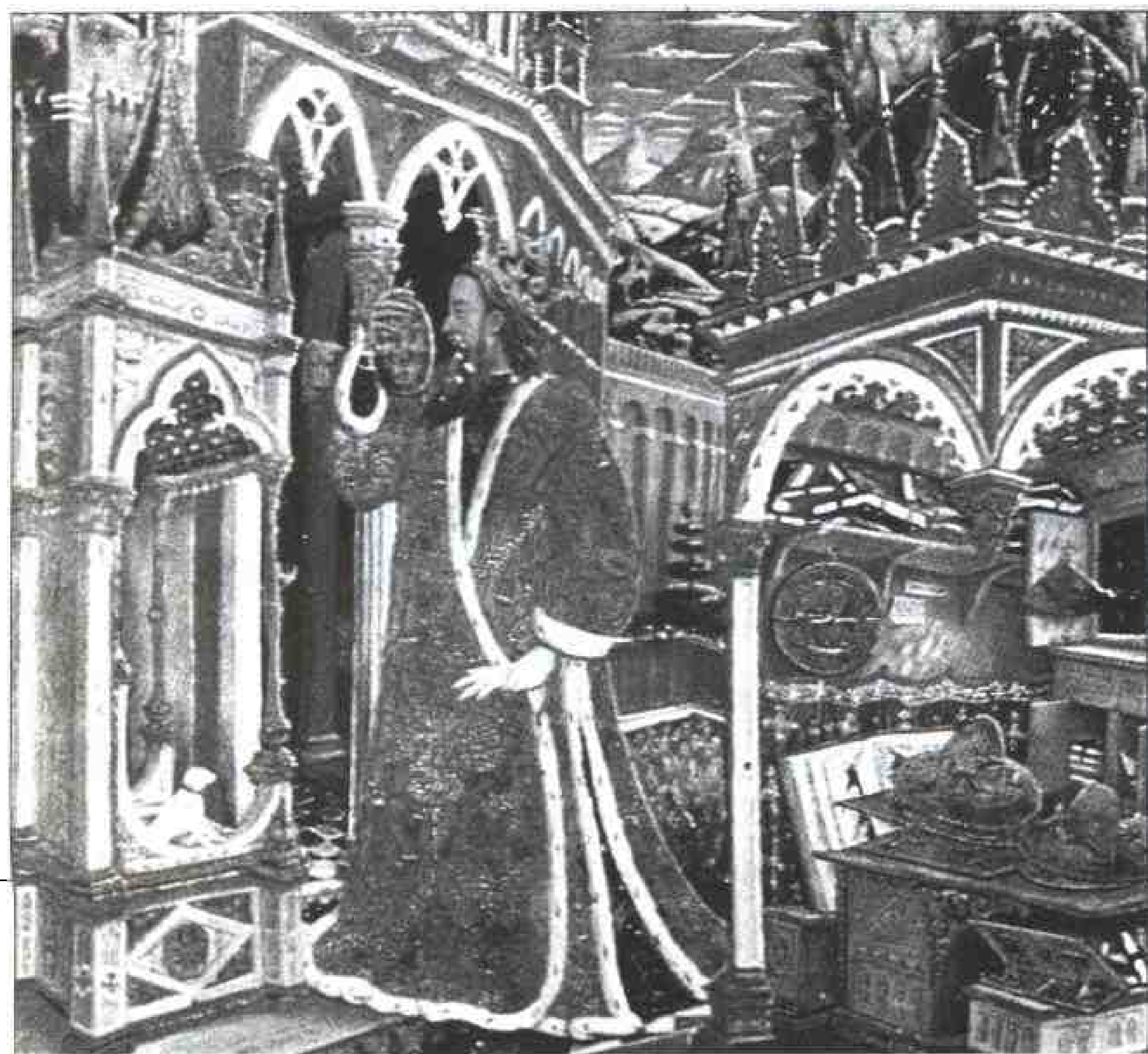
《至大论》最初的书名是《伟大的构造》(Megale syntaxis)，或是《数学汇编》(Mathematical Compilation，这里"数学的"意思就是"天文学的")，在古代晚期得名《最伟大的汇编》(The Greatest Compilation)，阿拉伯译文中将"最伟大的"写作"almajisti"，而在中世纪的拉丁文中它又被写成"almagestum"。这确实是一部权威的著作，它提供了几何模型和相关的表，可以据此计算太阳、月亮和五大行星在未来任意时刻的运动。书中还包括一份恒星表，其中有分布在48个星座中的一千多颗恒星，还标出了每颗恒星的黄经、黄纬和视亮度（星等）。有些历史学家曾认为，托勒密简单地搬用了希帕恰斯恒星表中的恒星位置，然后将每颗恒星的黄经减少2° 40′，以便与两人之间的年代所对应的岁差符合。几乎所有的人都卷入了随后发生的争论，现在已经证明，认为托勒密直接抄袭是一种过于简单化的解释。

托勒密后来以《便捷表》(Handy Tables)之名，出版了这份恒星表的一个经过适当修订的版本，有一个导论解释了该表的用法。他还出版了《至大论》的摘要本，名为《行星假说》(Planetary Hypotheses)，其中给他的《至大论》中的几何模型加上了物理尺度。

托勒密撰写了大量论著，论著涉及数理科学的广泛领域，特别是星占学、光学（包括对折射的讨论）和地理学。在他的时代之后用希腊文写作的数理著作，几乎没有可与托勒密相匹敌的。



在托勒密的圆周轨道中，地球位于圆心的一侧，"对点"对称地位于圆心的另一侧。行星以变速在圆周上运行，其速度在"对点"上看来是均匀的。这样，行星在运行到图中圆周轨道上部时速度变慢，而运行到下部时速度变快。



托勒密《地理学》的15世纪希腊文手稿中的托勒密形象。显示他在使用一个星盘。在中世纪，人们经常将作为天文学家的托勒密与统治埃及的托勒密王室相混淆，所以图中的托勒密戴着王冠。

托勒密的“对点”

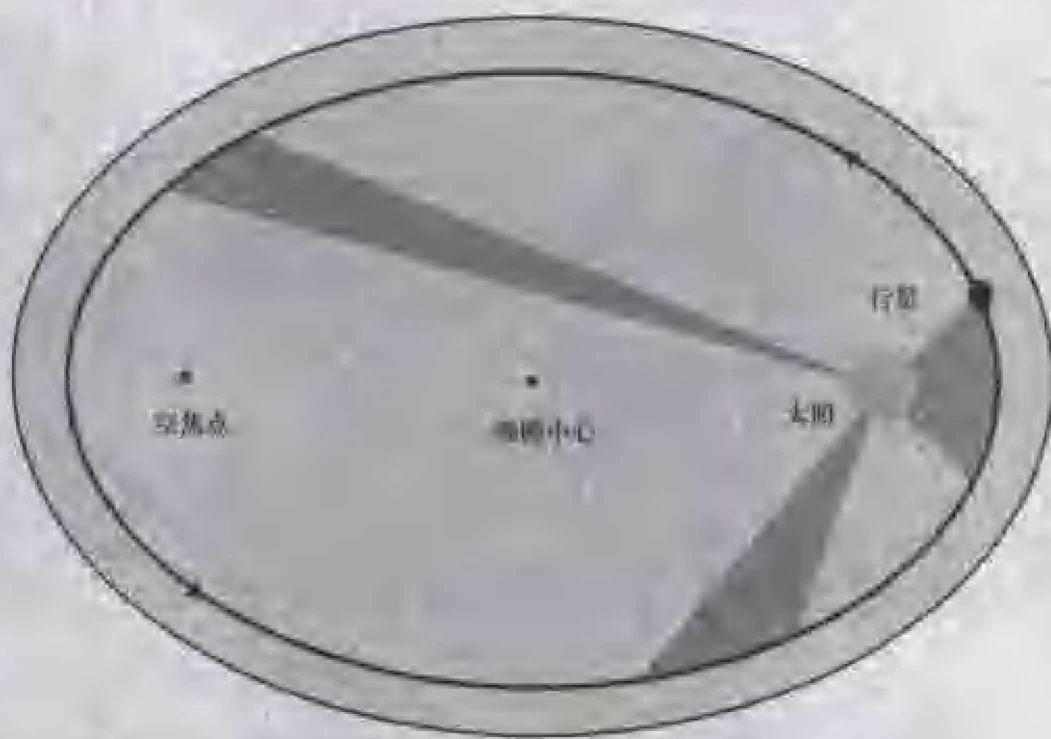
如果我们要想理解为何“对点”使用起来是如此便利，我们就必须借助现代的行星运动理论。托勒密准备牺牲天文学最基本的原则——圆周运动必须是匀速的。1609年开普勒公布的（行星运动三定律中的）前两条定律告诉我们，行星围绕着太阳在一个椭圆轨道上运行，而太阳位于其中一个焦点上。开普勒第二定律指示了行星在轨道上的运行速度：一根太阳和行星的连线（“矢量径”）在相等的时间内将扫过相等的面积。

依据第二定律，行星运行到远离太阳的时候速度变慢（矢量径变长），靠近太阳时变快（矢量径变短）。那么，对一个位于上述椭圆另一个没有太阳占据的焦点——空焦点——上的假想观测者来说，行星运动呈现何种状态呢？当行星运行到离太阳最远处（在空中运行得比平均速度慢），它也就位于离空焦点上的假想观测者最近的地方，此时它速度的减慢由于靠近该假想观测者而被掩饰（即呈现出较快的速度——译者注）。类似的，当行星运行到离太阳最近之处（在空中运行得比平均速度快），此时它速度的加快，对该假想观测者来说也因距离变远而被掩饰。结果是，从空焦点上来看，行星几乎是在天空中做匀速运动。

这样，行星在空间绕着太阳——其轨道是一个近似正圆的椭圆或干脆就是一个正圆，这关系不大——的运动，就可以用一个模型来很好地加以表达。在这个模型中，在空焦点上的观测者（此时假定轨道是椭圆），或者如果轨道是一个正圆，那就是同样位于太阳对面且离圆心有同样距离的“对点”上的观测者，看起来行星运动都是匀角速度的。因为这对于地球来说确实是真实的，因此对于太阳相对于地球的运动（即太阳周年视运动——译者注）也是真实的。

至于行星相对于地球的运动（不是相对于太阳），当然也是托勒密希望描述的，但这是行星相对于太阳，和太阳相对于地球的运动的复合。

从历史的角度来看，我们可以发现托勒密的“对点”是多么有用，因为它与开普勒的空焦点是密切相关的。



开普勒头两条行星运动定律告诉我们，行星绕太阳运行的轨道是椭圆，而太阳位于其中一个焦点上；太阳与行星的连线在相等的时间里扫过相等的面积。结果是行星在靠近太阳时运行得快，远离太阳时运行得慢。“对点”对于托勒密来说是一个有用的工具，因为它和开普勒的空焦点是类似的。（图中椭圆的偏心率被大大夸张了：实际上除了水星，其余行星轨道的偏心率都是难以观测到的，行星轨道事实上近于正圆。）

困扰过许多伊斯兰天文学家，也成为中世纪西方大学里经常争论的题目。对于那些被传授了关于亚里士多德匀速圆周运动同心球层的自然哲学的大学生来说，接受偏心圆和本轮已经够困难的了；接受“对点”则是极不可能的。由于这个原因，哥白尼在16世纪将“对点”视为一个自鸣得意之物，他在他的模型中就没有出现“对点”。

托勒密，他不朽的《数学汇编》即《至大论》，大约写于公元145年，提供了宇宙的几何模型，并能对日、月和五大行星这7个天体的运动给出相当精确的预先推算。他显示了，他模型中的所有重要参数都可以从观测中得来，尽管他通常的策略是从相反的方向去工作：先提出模型，然后通过将从模型演绎出来的数据与观测数据对比的方法，来“检验”模型。借助于《至大论》，数理天文学家（和星占学家）可以计算出未来任何时刻的行星星历表，在表中给出行星位置的黄经和黄纬值。

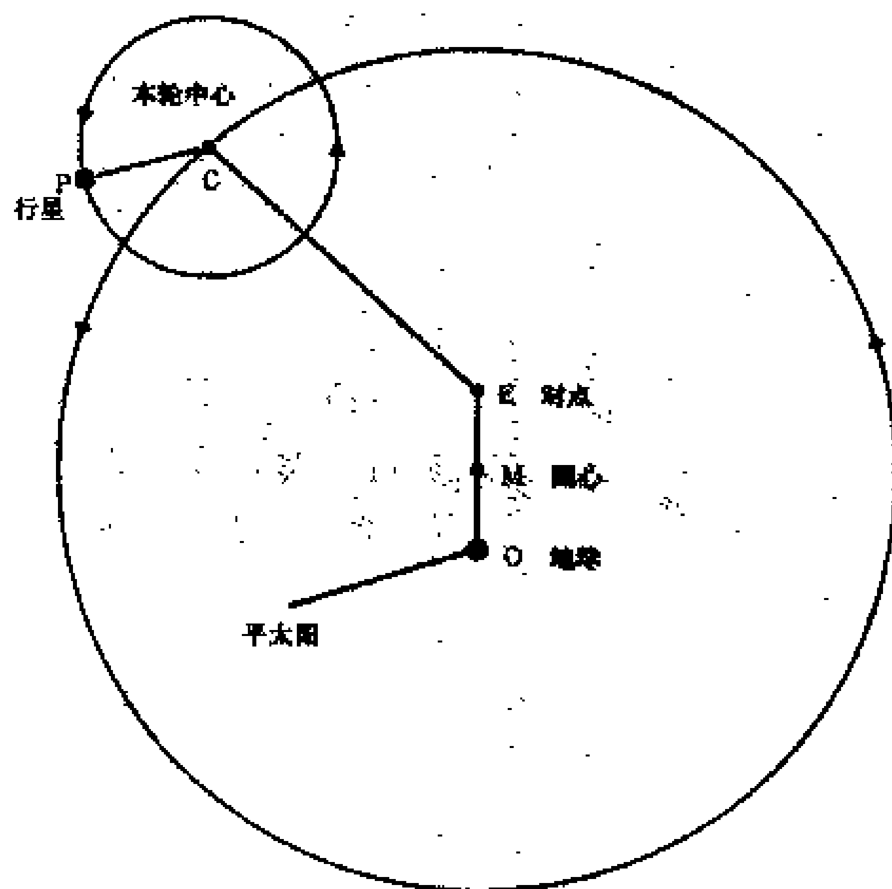
当然也有问题。月亮运动的模型，预报月亮在天空中的位置——指从地球上观测月亮的方向——确实足够好，但是携带月亮运动的本轮，相对于它在其上运行的均轮来说异乎寻常的大，结果月亮位于地球上方时，它和地球的距离可以在33–64个地球半径这样大的范围内变化。这样的话，月亮的视直径应该有一倍的变化，而这样的变化事实上不可能观测到。这一问题困扰托勒密的读者到何种程度，取决于他们在精确位置之外是否还要寻求别的。

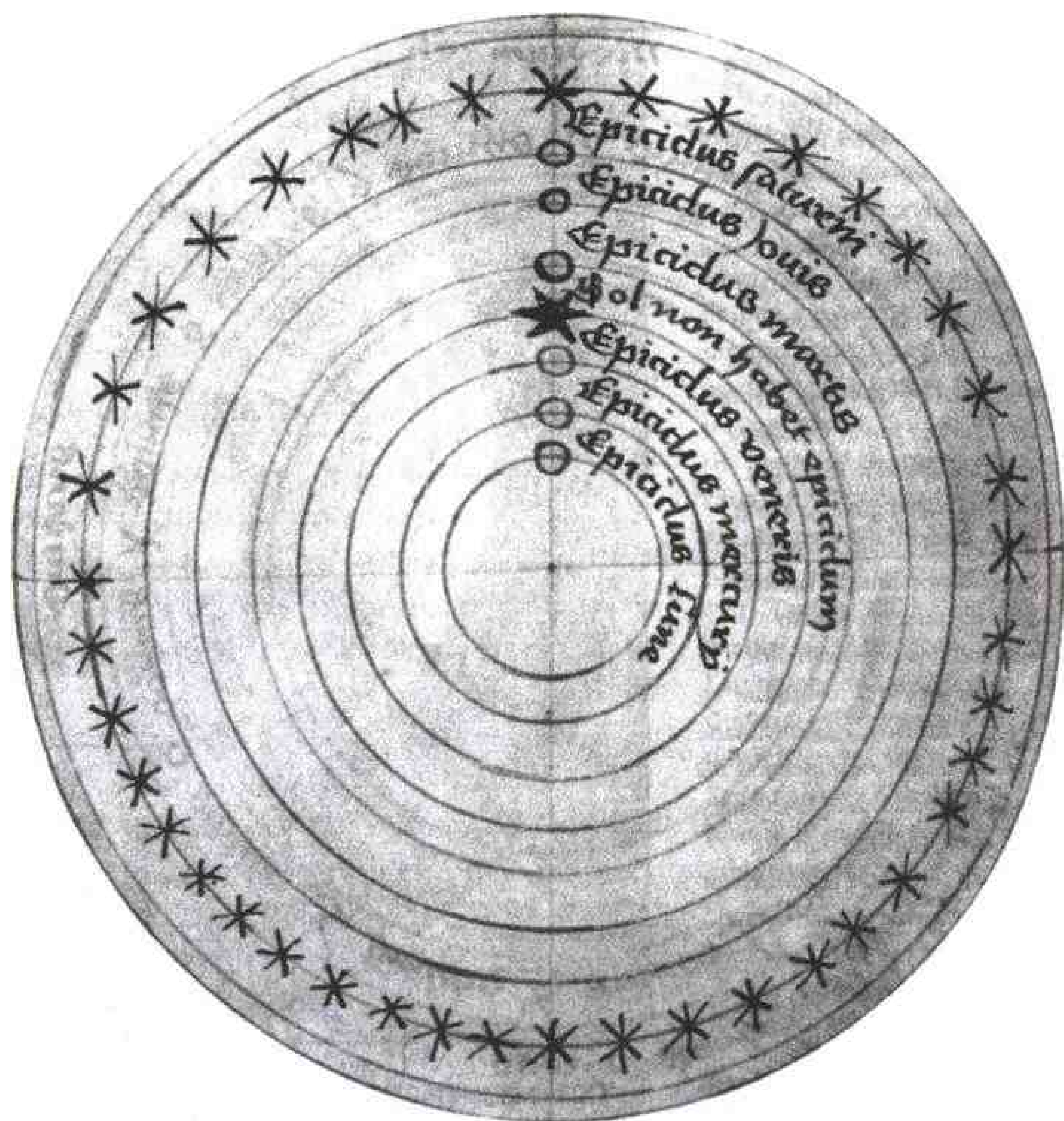
另一个问题来自比较特殊的观测事实。五大行星中的两颗——水星和金星，是永远无法在远离太阳的方位被看到的；它们随着太阳一起升起或落下，不像火星、木星和土星，可以在夜晚的任何时间在天空中能被看到。托勒密在他的模型中对此的处理，是令这两颗行星的本轮中心与一个“平太阳”连成一线，这样，这三者在一年中就会有同样的周期。然而，有些读者不喜欢这样的“特别”设计。

但这只是一些细枝末节。托勒密的《至大论》达到了它的预定目标：提供一

《至大论》中的一个模型

托勒密在《至大论》中的技术独创性，表现在他的火星、木星和土星的黄经运动（行星沿着太阳周年视运动轨迹——亦即黄道——运行）模型上。地球位于O点，M是大圆（均轮）的圆心，C是均轮上的一个点，也是行星P在其上运行的那个本轮的中心。E是OM延长线上的一个点（对点），故OM=ME。C在均轮上以有规则的变化着的速度运行，使得从对点E处看来，其运行是匀速的。行星P的运行，则要使得连线CP始终平行于O与“平太阳”（反映了在地球上的观测者确实是在绕着太阳旋转这一事实）的连线。随后，本轮与均轮半径的比例、“偏心率”OM，和两轮转动的速度变化规则等，都被选定以适合该行星的特殊运动。





一幅15世纪的图形：显示地球位于宇宙的中心，外面环绕着行星天层，其顺序是托勒密所选定的：月亮、水星、金星、太阳（它没有自己的本轮）、火星、木星和土星。土星外面是恒星所在的第一推动天层。

套计算日、月和五大行星在未来天空中精确位置表的程序。它的成就达到了人们几个世纪以来努力的顶点。

托勒密在《至大论》并未致力于整合出一个天空的“托勒密体系”，但他还是让自己就各行星的顺序——或者用术语来说就是它们对于宇宙中心的地球的高度——有所说明。让恒星处于最外层（就像欧多克斯和亚里士多德在五百年前所假定的那样），但是离开最靠近它的、运行状况也近似的行星却那么近，这看起来有点似是而非。根据这样的安排，土星——它的运动与恒星的区别仅仅是每30年绕行一周天①，是各行星中位置最高的，接着是木星（12年一周天）和火星（2年一周天）。在另一端，月亮（每1个月一周天）被安排在最靠近地球的球层上。

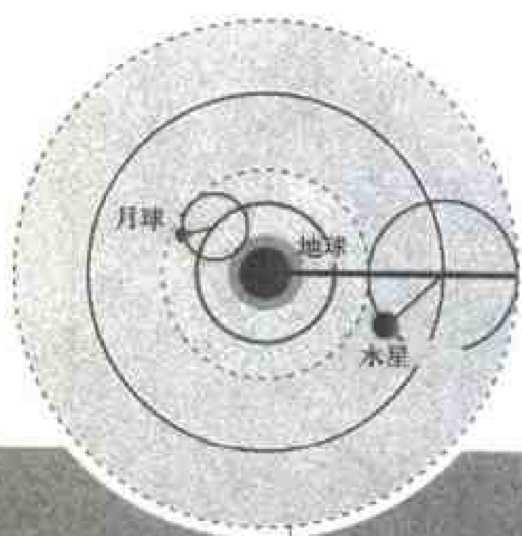
这时还有太阳、水星和金星的顺序未被确定。不幸的是，它们围绕作为中心的地球结伴运转，这样它们的运动就与其余的天体不同：它们是1年一周天。那么它们应该最靠近地球还是最远离地球？

由于太阳是独一无二的，托勒密决定追随先前的天文学家，将其余各行星安

① 这里的意思是，因为土星在天空中相对于恒星的运动非常缓慢（每30年一周天），所以它的运动看起来与恒星相差不大。——译者注

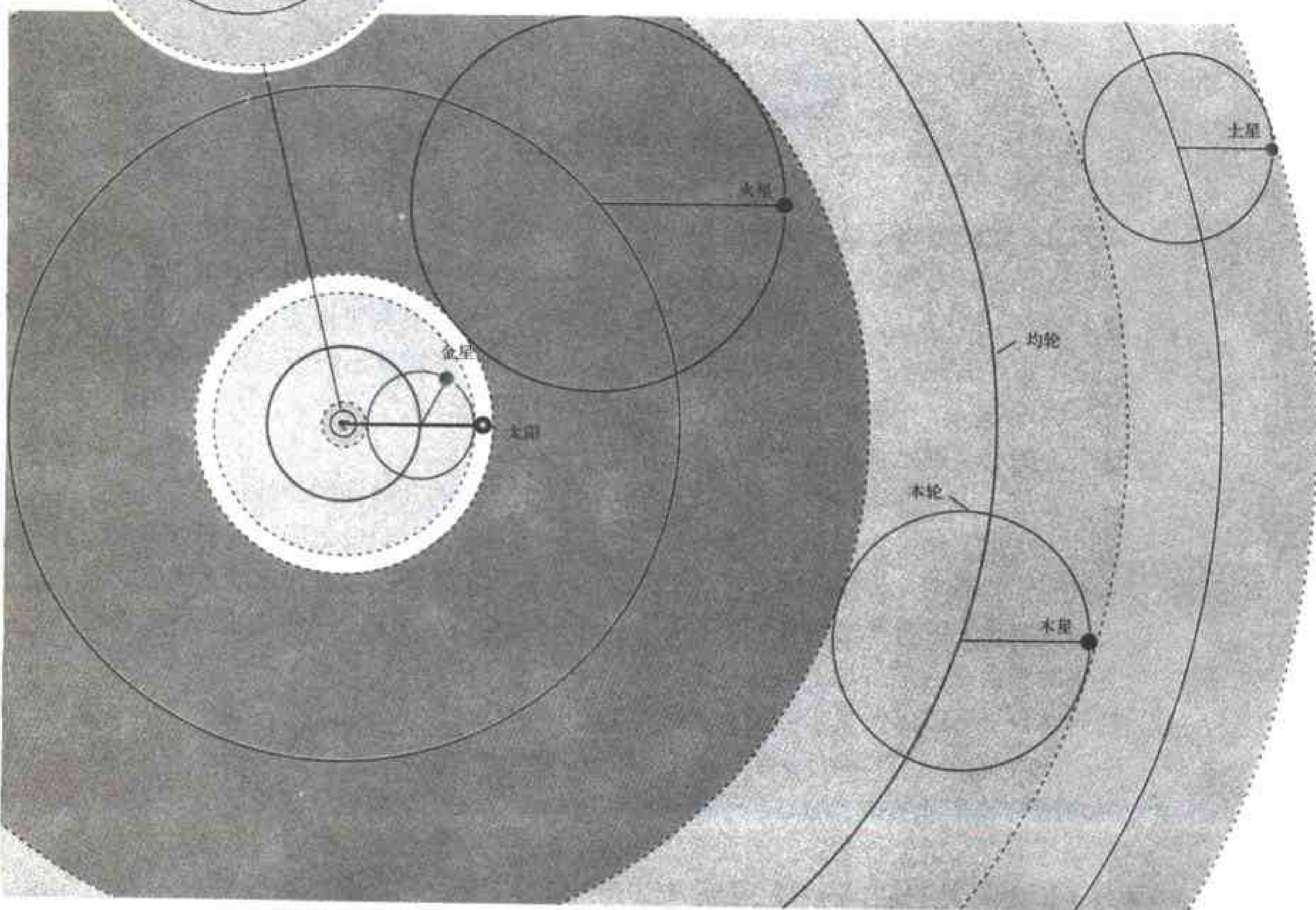
置在太阳的上面，这样也有相等的行星（按指金星、水星和月亮——译者注）在它下面。事实上，在拉丁的中世纪时代，太阳被视为一个威仪显赫的王者，每边由三颗行星随侍。因为先前的方案已经安排土星、木星和火星在太阳之上，只有月亮在其下，托勒密只好对等地将水星和金星放到太阳之下。至于这两颗行星的顺序，他选择将水星置于金星之下，恐怕也不会比掷一个硬币有更多的依据了。所以，依据各种各样的理由，从似是而非的到纯出猜测的，托勒密最终得出了如下的顺序：月亮、水星、金星、太阳、火星、木星、土星、恒星。

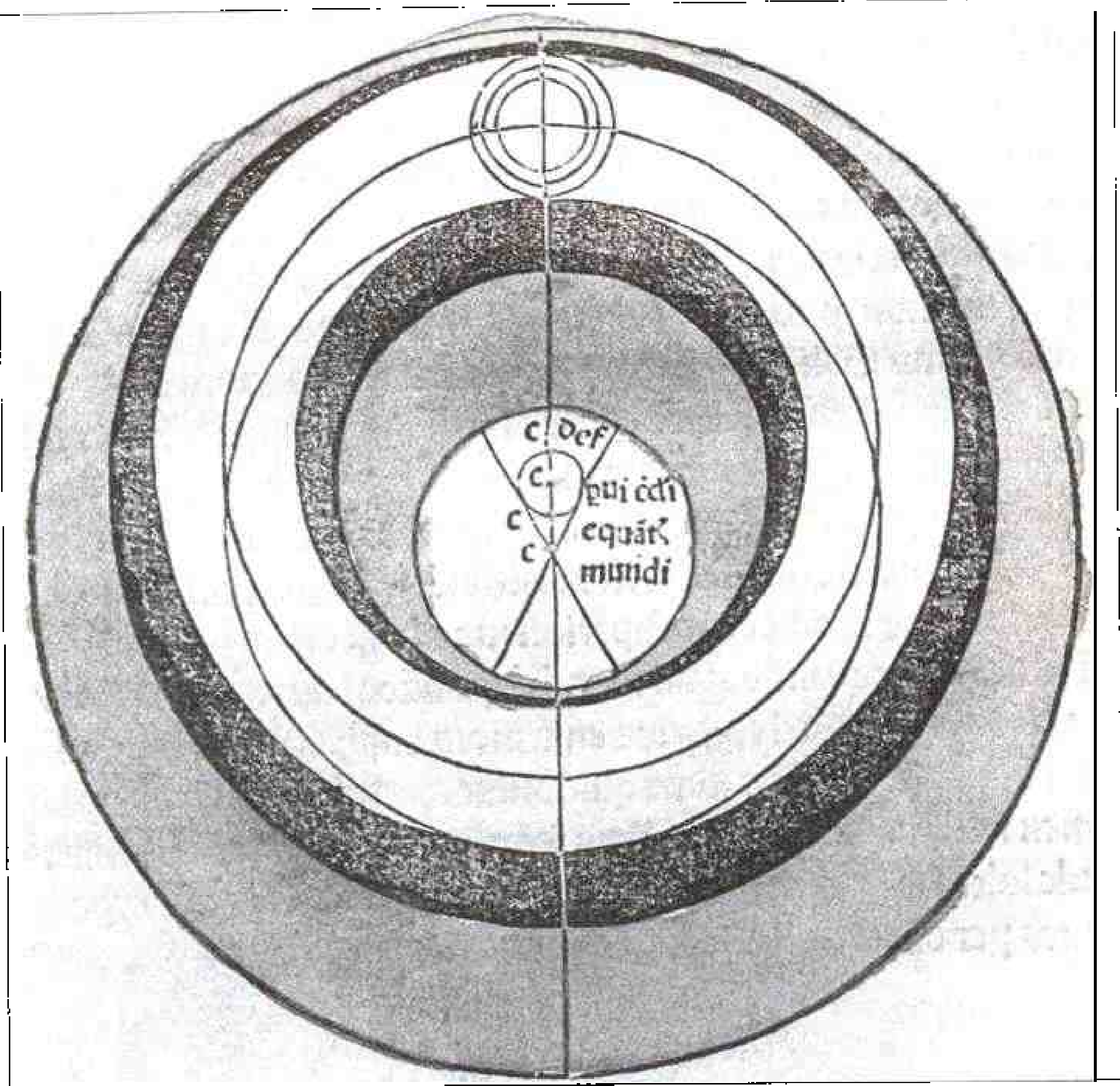
这使得托勒密在后来的被称为《行星假说》的著作中，将他的行星模型整合为一个物理上真实的系统，一个后来的匠师们试图——当然不可能完善——用金属仿制的系统。既已知道行星的顺序，他就假定天空中的所有可能的高度都被诸行星占满：每个行星都有自己时时占据的高度带，这些高度带相互之间既不重叠，也没有缝隙。



这样，他就可以使用如下事实（根据《至大论》）：月亮的最大高度是64个地球半径。因为这个高度带是会时时被月亮占据的最高处，与下一个被水星占据的高度带相毗连，他由此推测水星的最小高度也等于64个地球半径。既已知道水星本轮与均轮之比，并由此就可以推算出水星的最大高度。其值又等于金星的最

托勒密体系纲要。注意地球之外的每个环带都会时时被行星占据。注意携带水星和金星的本轮的中心和太阳连成一条直线，而火星、木星和土星本轮的半径都平行于地球和太阳的连线。根据哥白尼学说，我们可以理解这反映了这样一个事实：我们地球上的人是在一个绕着太阳旋转的物体上观测行星的。





由乔治·普尔巴赫（Georg Peurbach）在15世纪设计的水星运动的模型。普尔巴赫推广了伊斯兰天文学家传递的一个概念：行星运动的详细情况可以通过一个实体的球层系统来理解。此处携带着水星运行的本轮，由途中顶部的三层同心小圆表示，地球为中心的均轮运行于无阴影的环形槽中。作为太阳系最内层的行星，水星对于古代观测者来说，大部分时间是消失在太阳的炫目光芒中而无法看见的。托勒密假定有一个可以观测到水星的观测者，这意味着水星在其轨道上每绕行一周，将靠近地球两次而不是一次。于是，托勒密的水星模型就比其余行星的模型更为复杂了。

小高度，依此类推，直到他最后将恒星天层置于最外层的行星土星的最大高度。

运用上述方法，托勒密算出了整个宇宙的半径是地球半径的19,865倍，或者说75,000,000英里。有些现代作者否定这一宇宙图像，以为错得无可救药，指出这个宇宙尺度甚至还小于地球到太阳的真实距离。但这样就不是历史地思考问题了。倒不如说，正是在托勒密的工作中，宇宙尺度第一次变得如此巨大，以至于让人类的心灵难以真正理解它了。

希腊人设计能够描述太阳、月亮和五大行星运动的几何模型的战役，由托勒密的天文学著作带来了令人自豪的胜利。行星的未来位置，现在可以被预言得令人赞叹，看起来几乎没有理由设想，未来的天文学家还能在推算和观测之间做出更好的吻合。托勒密的程序征服了未来14个世纪的天文学家——事实上，在文艺复兴时期由哥白尼发动的对托勒密天文学的激进修订，是靠甚至比托勒密更伟大的希腊自然哲学家的关于匀速圆周运动的许诺来激励的。

圆周运动最终屈服于第谷·布拉赫的观测精度。但是另一方面，在这个“罗马帝国的和平”崩溃之后，属于托勒密时代尚未出现的文明的天文学家，将为掌握《至大论》的错综复杂、为反对一种哲学焦虑的背景而奋斗，这种哲学焦虑是基于托勒密创立而且必须使用的那些方案的。

中国天文学

中国的传统术语称有人居住的世界为"天下"。也就是说，世界是在天空之下的。从天文学的角度来看，中国人和别人一样是在同一个天空之下，但是他们解释从天空中所见景象的方式，往往是独特的。

中国是没有单独的天文学科的，但是它有历法。历法是一种旨在通过仔细测量、长期记录和数学计算来掌握天象规律的学科。另一方面有"天文"（天空的景象），其从业者专事观测不可预测的瞬间天象，并试图解释这些天象对于人类世界的意义。[1]

然而，有一个重要的因素将历法和天文联系在了一起：这两者都被认为对于国家具有极端的重要性，这两个学科的从业人员几乎都是帝国官方机构的成员。大约从公元前1000年开始，宇宙的道德方面和自然方面的秩序，被视为一个有点非个人化的实体，即所谓"天"，它的意志能够使得人间世界得到好的统治。如果统治者在治理国家或处理他的私人生活方面举措不当，就会导致"天"对自然界正常状态的干扰，作为"天"感到不悦的一种表达。这类干扰可以包括洪水、饥馑和瘟疫，但是天空的失序（指发生异常的天象——译者注）是所有这些警告未来有更大麻烦的凶兆中最为严重的。因此对于帝国的统治者来说，谨慎的做法是保持一个专职的天象观测者，他的任务是记录、报告并尝试分析所有的异常天象。这就是"天文"专家的部门。另一方面，历法专家则致力于探索天象的所有可辨别的规律，并将它们编成法典，目的是将所有可预见的天象向君主提出报告，使君主能够公布一个精确的星占——历法年鉴（即中国古代的历书——译者注），来显示他在保持宇宙秩序方面的效率。

对历法从业者的活动的详细记录始于公元前104年，这一年汉武帝颁布了一个新的数理天文学系统（即《太初历》——译者注）。此后直到公元17世纪，相继有47个这样的系统被颁布。所有这些系统的核心目的，是要运行一个阴阳合历，在这样的历法中，一个回归年和12个朔望月，以在适当间隔增加闰月的方法，使之与季节周期同步。朔望月始于日月合朔（天文学上的新月，即日、月黄经相等的时刻，中国古代称为"朔"——译者注），而季节最基本的时刻标志点是冬至。但是除了预报朔和冬至，在官方颁布的天文表中，习惯上还要包括预报可见的行星运动、预报月食的方法。日食则从来没有找到什么可用的方法予以精确预报，因此这个问题为"天文"留下了很大的余地。历法从业者所使用的越来越复杂的数学方法，是代数的而非几何的，这些方法注重天体运行的长时段重复周期，而不注重天体在三维空间中的运行情况。与古希腊人和中世纪的欧洲人不同，中国历法专家很少关心宇宙结构方面的讨论。在汉帝国的大部分时期，人们满足于假定有人居住的世界是一小块中心区域，靠近平面大地中央。这个平面大地是一个绕着倾斜的轴旋转的天球的直径面。天体在该天球的内面移动，但它们靠何种机制来进行这种移动则从来无人予以讨论。

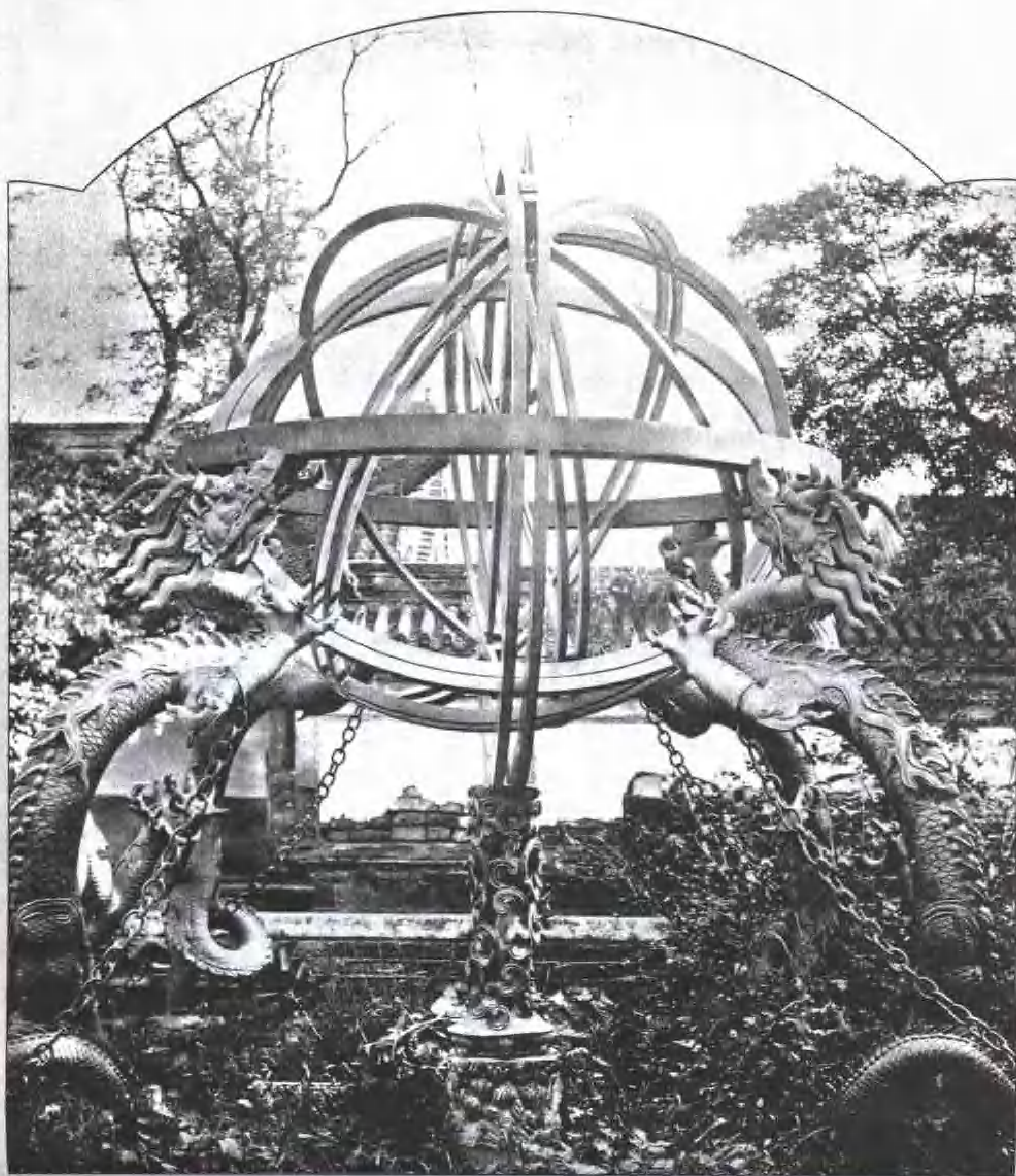
至于"天文"专家的活动，则可以追溯到公元前第二个千年的后期，那时甲骨文上已经有关于新星（nova）的观测记载。从大约公元前200年开始，已经可以在官方文献中找到关于新星的连续的记载。除了新星，官方记录中还有流星雨、彗星、日食、太阳黑子，以及异乎寻常的云、极光之类的天象。在很多情况下，这类记载的详细程度和精确程度，对于有兴趣确认超新星（supernova）遗迹或追踪哈雷彗星早期记录的现代天文学家来说已经足够。像历法专家一样，这些异常天象的观测者使用了制作精良的大型浑仪和其它刻度仪器，使他们得以依靠肉眼观测记录天体出现的位置，与第谷的工作出现之前的欧洲人相比，其精确程度毫不逊色。



公元904年的一幅中国星图，其中左侧显示的是大熊星座。

① 此处作者的说法稍欠准确："天文"所观测的对象，也包括日、月和五大行星这类可预测的天象。——译者注

古代浑仪，制作于公元1437年。浑仪包括一些金属环，表示黄道、天球赤道和其它天空中的（假想）圆环。这些金属环可以用来演示和测量天球坐标。



（江晓原译）

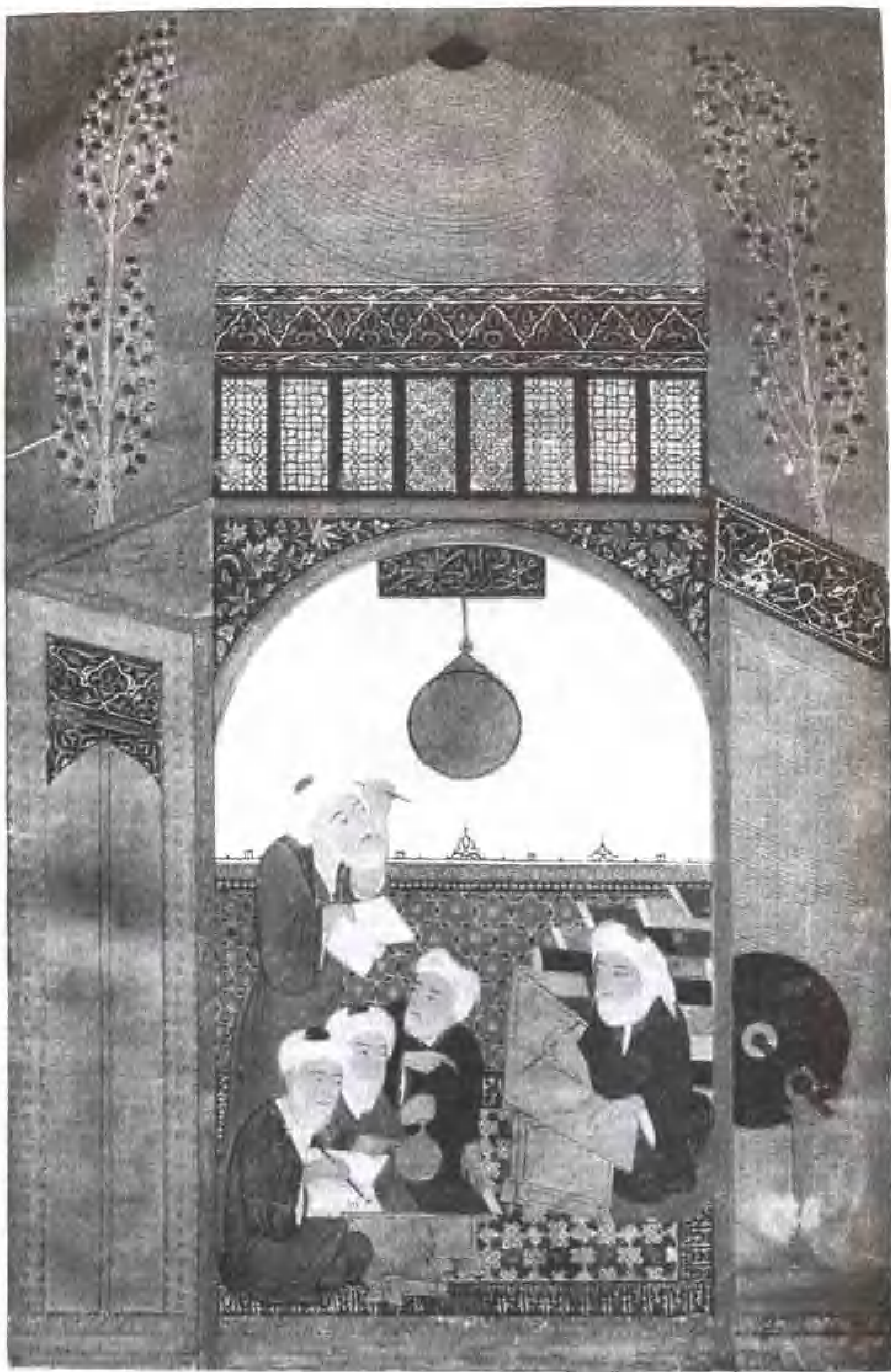
第三章 伊斯兰天文学

希腊几何天文学为了达到以足够精度预测七政——太阳、月亮、水星、金星、火星、木星和土星——在恒星背景上的运动，花了将近五百年时间。在托勒密写成《至大论》的年代，即公元2世纪，雅典文化的黄金时代已经成为遥远的追忆，罗马的权力也已经显出衰落的征兆。一些巴比伦和希腊天文学的元素已经融入印度，在那里它们最终被阿拉伯作者恢复成为主流传统。尽管在中世纪晚期的君士坦丁堡和别处的图书馆中，许多希腊原文著作（包括《至大论》），仍以尘封的手稿被保存着，而对自然界的研究则在一个新生的宗教——伊斯兰教——的文化语境中得到延续。

公元4世纪中期，一个学园在美索不达米亚的埃德萨（Edessa）由圣伊夫林（St. Ephrem）建立起来。那里说古叙利亚语，但是希腊文也被研究，一些亚里士多德、托勒密的著作，和当时盖伦（Galen）的医学著作，被译为古叙利亚语。公元489年，学园被（东罗马）皇帝芝诺（Zeno）关闭，一些教师进一步向东方转移，到达琼迪沙普尔（Jundishapur，在波斯西北部——译者注）。在那里他们将更多的医学和别的著作从希腊文翻译成古叙利亚语：数量不大，但是通过给出获取希腊文原文著作的门径，提供了一个学术积累的范例。

公元570年，先知穆罕默德生于贸易中心麦加。在公元632年他死后不久，他所创立的宗教以惊人的速度在中东扩散，并越过北非，进入西班牙。公元762年，他的继任者在中东建立了新都巴格达，新都位于底格里斯河岸最靠近幼发拉底河之处，这就为接近在琼迪沙普尔的基督教医师们提供了方便。巴格达宫廷的要人们向这些医师寻求告诫和建议，这些接触使得穆斯林中的精英人物大开了眼界，知道了有遗产存在，那是来自古代的智慧珍宝——其中大部分以手稿的形式保存下来，躺在遥远的图书馆里，而且是以异族语言撰写的。哈伦·拉希德（Harun al-Rashid，从公元786年起任哈里发）派遣代理人到拜占庭帝国收购希腊手稿，到公元9世纪初期，一个翻译中心即著名的“智慧宫”，由哈里发马蒙（al-Ma'mun）在巴格达建立起来。在那里，说叙利亚和阿拉伯语的学者，在基督徒胡那因·伊本·伊沙克·伊巴迪（Hunayn ibn Ishaq al-Ibadi，公元808—873年）的领导之下，通力合作，将原文或古叙利亚语的希腊著作译为阿拉伯文。

阿拉伯文一时成为一种国际性的科学语言，这本身就是令人惊异的。它是诗的语言，是《古兰经》的语言，是关于伊斯兰宗教学问的语言。无论何处，只要伊斯兰统治了，阿拉伯文就被人们熟悉，将这些希腊著作译成阿拉伯文，使得这些著作得以广泛传播，不仅穿越了中东，而且越过北非，进入伊斯兰的西班牙。最终，作为公元12世纪基督教在西班牙反对摩尔人所取得的进展的主要成果，这些著作到了基督徒手中，许多著作被译为拉丁文。希腊著作进入了拉丁世界，尽管这种迂回的路径（例如，可能通过叙利亚文、阿拉伯文、卡斯提耳文）使这些著



伊斯兰天文学家在工作，取自15世纪早期的手稿。天文学家站着，看来在使用一个很大的（因而毫无疑问，也是很精确的）星盘类的仪器，以测量一个天体的纬度。四个助手正在借助于一具小型星盘，与天文学家的测量相互参照，并将测量数据笔录存档。

作经受了持续的转译而有所损害，然而它们仍然提供了一个天文学思想传统的重要连续性。

天文学和伊斯兰的实践

10,000卷左右以阿拉伯文、波斯文或土耳其文写成的天文学手稿被保存至今，继续在图书馆被束之高阁。但是显然其中一大部分天文学著作是属于伊斯兰的，它们或是宗教学者研究民族天文学之作，或是天文学家研究数学技巧之作，每一组手稿都致力于同样的伊斯兰天文学实践问题。现存天文学著作中其他类型的相对很少，尽管它们也有很重要的历史意义；有些人试图完善《至大论》中的行星模型（这是被翻译的著作，后来又在巴格达重译），而另一些人则继续哲学家和天文学家之间关于宇宙本性的争论。

早在翻译开始之前很久，各民族天文学之间广泛的交流在阿拉伯半岛已经开始了。这种交流融合了反映在伊斯兰评注和论文中的对天空的看法，以便创立一个基于天空中实际所见景象的、不依赖于任何现有理论支持的简单的宇宙学。与此同时，宗教活动对数理天文学家已经尝试过的解决方案，产生了三个特殊的挑战，其复杂性经常超过社会的实际需要。

第一个挑战，是继承自前伊斯兰时代的太阴历的改编形式。通常12个朔望月不满一个回归年，所以要在适当时候以一个外加的月来补充，使得每个年可以大致上与四季循环同步；但是穆罕默德的教义显然反对这样的置闰，所以穆斯林的“年”至今仍比回归年短11天。其后果之一是，穆斯林的神圣月份斋月（Ramadan）可以——不像基督徒的四旬斋——出现在一年中的任何季节。每一个月的起始之日是新月——不是天文学上的理解（计算显示，此时太阳、月亮和地球在同一条视线上），而是靠实际观测，此时月芽首次在黄昏的天空出现。在适当日子的黄昏，观测者们将被送往适合观测的地点并得到指示，来观测西方的天空；如果月芽在这一夜未能被观测到，他们将会在第二天继续尝试。

简单的程序导致困难。天空并不总是晴朗的；即使是晴朗的日子，一个城市的观测者也许在某个黄昏看到了新月，但是相邻城市的观测者在这一天可能没有看到，结果这两个城市将会在不同的日子开始同一个月份。早期穆斯林天文学家遵循一个他们在印度资料中发现的判据，即如果在日落时刻太阳和月亮在当地地平线上的差至少为48分时，新月将可以被观测到。托勒密关于月亮运动的理论，在新月问题上的精度是可以令人接受的，但它是相对于太阳路径（黄道）来描述月亮的位置的，而黄道和地平线是斜交的。要将这一运动转化为以地平坐标来表达，则是一个球面几何问题，后来的穆斯林天文学家设计了更为精密的条件，并且编制了精巧的表来帮助最后的计算，以便产生包括每月之始可能的新月视觉信息的年历，但是甚至到今天这个问题在穆斯林世界仍是一个挑战。

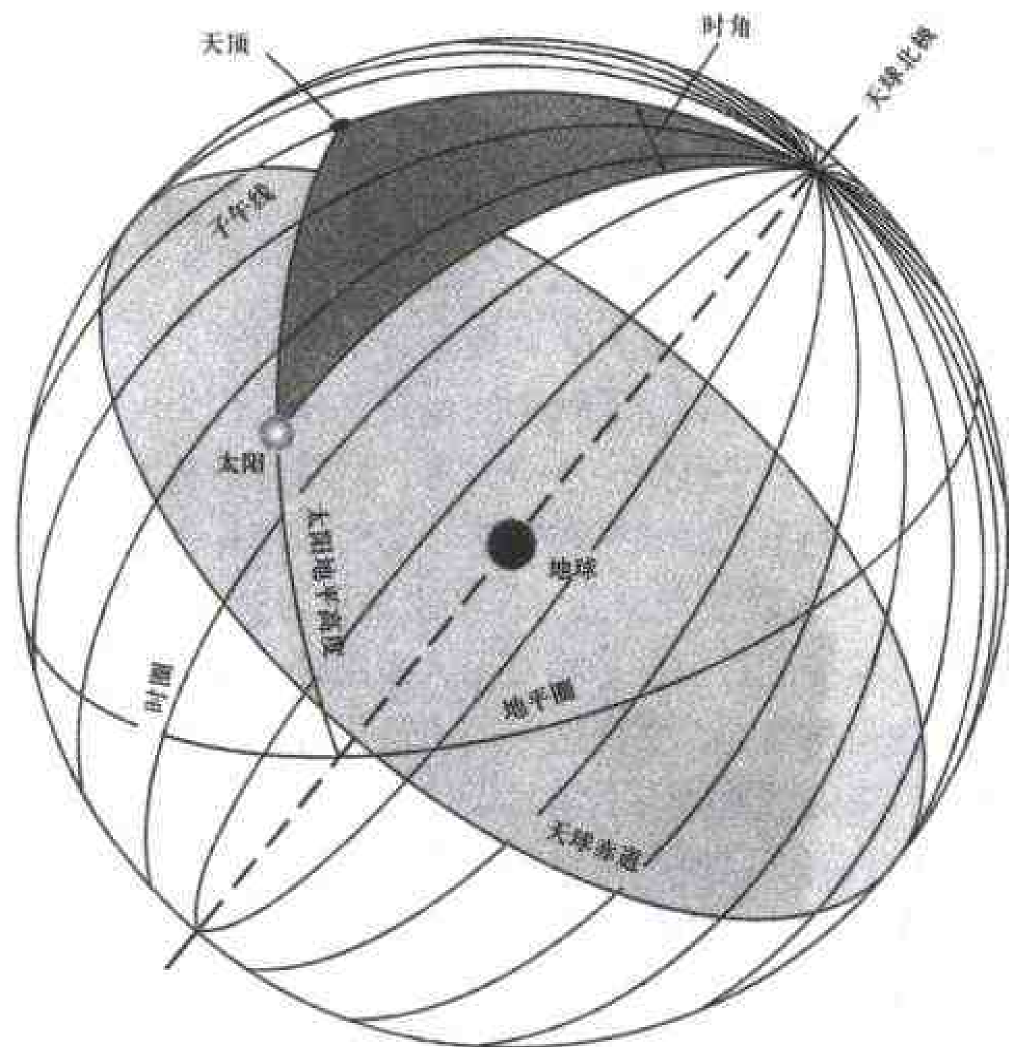
第二个宗教性的需求迫使天文学家们关心祈祷的时刻，这样的时刻按照规定有五个：日落、黄昏、拂晓、正午、下午。确定后面两个，外加一个自发自愿的晨祷，对应于第三、六、九个（可变动的）白昼“小时”，有一个来自印度的近似公式，总是将这些“小时”与影长的增加联系在一起。如何将这些规则表达为统一的时和分，这一问题激起了天文学家的兴趣，尽管报告祈祷时刻的人实际上发出祈祷通告更可能是依据阿拉伯民族原有的简单的天文学。早在公元9世纪，一

右页图为16世纪晚期奥斯曼土耳其手稿，显示一架大型浑仪（天球上诸基本圆环的模拟表示），以木架支撑。画面中间的人正在使用一个圆形悬垂锥，来确定子午环（南北方向）的位置，该环几乎已经在画面的边缘。画面上部，两个天文学家站在有些不稳定的位置上，正在进行观测，助手在小桌上记录着观测数据。

个智慧宫的成员花拉子模（al-Khwarizmi，此人名字的讹误拼法给了我们“运算法则”这个词汇〈algorithm〉），编制了对应于巴格达纬度的祈祷表，而第一部根据巴格达地区太阳地平高度确定白昼时刻和根据亮星地平高度确定夜间时刻的表[①]，接着也很快就出现了。要解决这些问题，需要根据天球上球面三角形已知的边或角来求解未知的边和角。这样，求白昼的时刻将从解算一个球面三角形开始，其三个顶点是天顶、天球北极（天顶与天球北极的连线就是当地的子午线，也就是天球上通过当地正北方的大圆——译者注）和太阳位置。观测者知道自己所在之处的地理纬度（因而也就是当地天顶与天球北极之间的角度）[②]，也能根据一年中的日期知道太阳在黄道上的位置。观测者测量太阳的地平高度，则当地时间就由子午线和太阳时角圈（太阳到天球北极的弧）之间的角度给出。必要的公式来自天球在二维空间的投影，使用来自印度材料中的技巧。后来，球面三角学也被使用了。

托勒密用来解算球面三角形的方法，来自公元1世纪末左右亚历山大里亚的迈尼洛斯（Menelaus）。其中包括笨拙的程序，为了求解一个未知量，需要有五个已知量，这对于解算所有球面三角学的基本问题已经足够，但是意味着根据太阳地平高度确定时间牵涉到若干定理的应用。

到公元9世纪，现代三角学的六个函数的中世纪等价物已经被发现，但是托勒密仅仅运用了一个单一的函数，其中涉及圆的弦。一个角度的正弦的概念（在一个直角三角形中，它等于该角度的对边与斜边之比），从印度被介绍给了伊斯兰，一同被介绍进来的还有在计算影长时非常重要的函数正切和余切。伊斯兰天文学家发现了三角学的基本恒等式，从此大大简化了天球上球面三角形所涉及的计算。



从太阳地平高度计算白昼时刻。计算程序包括，找出在天球北极处的球面三角形（图中阴影部分），其顶点分别是太阳、观测者所在当地天顶、天球北极。天顶和北极之间的角距离就是观测者所在的地理纬度（的余角）[③]，天顶和太阳之间的角距离是太阳地平高度的余角，太阳和北极之间的角距离（根据定义）是太阳在这一天的赤纬的余角。这一天球北极处的球面三角形就对应于时间。

最后，穆瓦奇特（muwaqqit）——即“授时者”——的官署，

① 术语“地平高度”是指以当地地平圈为基准圈的坐标系统——地平坐标——中的纬度，这个数值直接反映了天体在当地地平线上升起的高度。当这个值达到90°时，天体升至当地天顶。同一个天体、在同一个时刻，在不同地点的地平高度是不同的。——译者注

② 原书此处有误：当地地理纬度应是当地天顶与天球北极之间角度的余角。——译者注

③ 原书此处有误：作者将这两个成余角关系的值误为等同之值。——译者注



也为清真寺而设立起来。这至少为那些有能力的天文学家在社会的中心结构之一提供了一个制度上的避风港，其发展的结果是天文学著作在数量和质量上都有了迅速的增长。由于伊斯兰对星占学有敌意，天文学家们成为穆瓦奇特后自然不会再得到本来有可能给星占学家的金钱方面的奖赏，但是作为补偿，他们在社会上获得了安全并且受人尊敬的地位。

第三个对天文学的挑战，来自伊斯兰日益增长的需求——因为许多宗教性质的法令，特别是清真寺的朝向，必须向着麦加的宗教圣殿"克尔白"（Kaaba，意译为"天房"，在麦加大清真寺广场中央，殿内供有神圣黑石——译者注）。在伊斯兰最初的两个世纪，西起西班牙，东至中亚，许多清真寺的方向是朝南，理由是当年先知在麦地那（在麦加北面）祈祷时是面向南方的。在麦加以外的地方，"奇布拉"（qibla，有时也拼成 kibla——译者注），即朝圣方向，假定为朝圣者向麦加出发的方向。还有些人再次采用"克尔白"自身的方向，其主轴面向老人星（即船底座α星）升起的方位，副轴则顺着夏季日出和冬季日落方位（的连线）。但是在后来的几个世纪里，穆瓦奇特和专业的天文学家们，将心思花在如何运用已知的地理学数据来从数学上确定"奇布拉"，球面三角学公式得到发展，从中计算出各种用表。一个突出的成就，年代大约始于公元11世纪，是为以麦加为中心的世界地图而发展起来的制图网格，从这样的图中，可以直接读出"奇布拉"和到麦加的距离。这项活动的顶点出现在公元14世纪的大马士革，是一个穆瓦奇特哈里里（al-Khalili）制作的一张表，其中给出了地理纬度10°－56°之间、从麦加向东和向西经度各1°－60°之间的区域中每一度的"奇布拉"，这是从一个复杂而精确的公式经过浩繁的计算而得到的。

伊斯兰天文台的出现

《古兰经》宣称"除了真主，没有人能够预知未来"，伊斯兰宗教领袖和他们的基督教同行一样地坚决谴责星占学——也一样地无效。统治者和民众都认为，星占学有巨大的实际应用价值，他们是准备为他们所需要的信息付钱的。星占学家在市场上活动时和算命的人几乎没有什么不同，但是在君王的宫廷里和别的地方，人们就会发现星占学家也就是天文学家，他们的星占学预言是基于行星位置表做出的。

在行星天文学方面的早期阿拉伯著作，是一种调和折衷的产物，其来源有前托勒密时代的希腊著作，同样重要的来源还有波斯和印度。《至大论》的翻译改变了这种局面，显示了亚历山大里亚天文学家无可比拟的优越性。然而，托勒密行星模型的有效性，不仅依赖于它们自身的几何构造，也依赖于其中所用参数的精确程度；但到此时时间已经过去了几个世纪，这些参数显然有必要加以改进。托勒密向他的读者演示了如何根据观测导出参数，而对这一课，他的伊斯兰继任者们学得很好：我们发现，他们的观测记录大部分都有数值改进的设计，使用了太阳轨道偏心率和黄道行星的倾斜度（与天球赤道的夹角）之类的量。这些观测需要仪器精度的提升。

最初使用的仪器是小型和便携式的，但在寻求更大精度时，导致了对大型固

定仪器的需求。到处都有君主和有势力的赞助人出资建造这类仪器；因为这些仪器不再是便携式的，它们需要有永久性的家，这种风尚就成为建造天文台的开始。但是部分宗教权威对星占学的敌视，以及某个赞助人的死亡，或是他失去了面对批评的勇气，都将给天文台带来末日。

两个更大的天文台确实被毁坏了。在开罗，根据法蒂玛王朝哈里发的维齐尔（vizier，伊斯兰国家的高官大臣）的命令，于公元1120年开始建造一个天文台，次年这位维齐尔被谋杀之后，工程在他的继任者的领导下继续进行。但是到了公元1125年，仪器已经造好而房屋尚未完工，新的维齐尔被哈里发下令杀死，他所谓的罪名中包括"与土星交往"。天文台被摧毁，职员们被迫逃亡。

另一个类似的命运，由土耳其苏丹穆拉德三世（Murad III）加于天文学家塔奇丁（Taci al-Din）在伊斯坦布尔（Istanbul）的天文台上。该天文台公元1575年开始建造，1577年完工，刚巧与现代欧洲第一个重要的天文台——第谷的天文台（详见本书94-99页）——同时。除了主建筑，还有一个附属的小天文台，根据艺术家在本书第52页之图中建筑物上部的记录：

> 15位经过甄选的为塔奇丁服务的科学家已经准备就绪。在这个天文台，每座仪器都由五位智慧而有学问的人协助：两个或三个人观测，第四位是办事员，还有第五位负责杂务。

工程恰好在观测公元1577年明亮大彗星时完工。塔奇丁将这一天象解释成关于苏丹与波斯人的战争的吉兆，但是土耳其人被证明远未取得令人满意的胜利，而另外的不幸又降临苏丹，包括瘟疫的爆发和几位重要人物的死亡。公元1580年，宗教领袖说服了苏丹，使他相信试图觊觎未来的秘密只会带来不幸，他下令天文台应该被"从远地点到近地点"彻底摧毁。第谷的天文台也未能支持多久：公元1588年他的赞助人（按指丹麦国王——译者注）去世，天文台也很快就衰落了。

只有两个伊斯兰天文台存在得稍微长久一些。第一个在马拉盖（Maragha），在今伊朗北部，这是波斯的蒙古统治者旭烈兀（Hulagu）为波斯天文学家图西（Nasir al-Din al-Tusi，公元1201-1274年）建造的。旭烈兀迷恋于星占学。

这座天文台（其地基至今还在）从公元1259年开始动工，建于一个小山平坦的山顶上，包括一个宽阔的图书馆；学生们无疑曾在这里接受了他们所受系统训练的一部分。天文仪器是安放在室外露天的，其中包括一座半径不下于14英尺的墙象限仪（一种固定在正南北方向，用来测量地平高度的仪器），一座环的半径约5英尺的浑仪（显示基本的天文学环组，也可用来测量天体位置）和许多较小一些的仪器。借助于这些仪器，天文学家小组（史称"马拉盖学派"）在公元1271年完成了一部《积尺》（Zij）[1]——即根据托勒密《便捷表》（Handy Tables）的传统而编纂的天文表集，包括对使用方法的介绍。

三年后图西离开马拉盖前往巴格达，他在那里去世。他的离去使马拉盖天文台结束了创造性的时期，尽管观测活动一直持续到了下一个世纪。

1) "积尺"是中国古籍中对此的称呼，即"天文表"、"历表"之意。阿拉伯天文学家留下了多部积尺。——译者注








另一个重要的伊斯兰天文台，是乌鲁伯格（Ulugh Beg，公元1394－1449年）在中亚的撒马尔罕（Samarkand，在今乌兹别克境内——译者注）建立的。他在公元1447年继承王位之前，早就是行省的统治者了。建立这个天文台不需要请求什么赞助人：这个天文台最热心的，很可能也是最博学的成员，就是乌鲁伯格本人。三层的天文台于公元1420年建成。主要的仪器也是装置在室外的：两堵南北方向的大理石墙，中间分开约20英寸，架设于其上的仪器形式是一架六分仪（sextant，仪器主体是一个圆周的六分之一，用来测量天体的地平高度）[①]，其活动范围则设计成可以观测太阳、月亮和五大行星。这架仪器的半径，竟超过130英尺（约40米——译者注），正是伊斯兰天文学家认为仪器尺度越大精度也就必然越大的错误观念的展示。



仙女星座。中世纪伊斯兰抄本，原图为公元10世纪波斯天文学家苏菲（Abd al-Rahman al-Sufi）所绘。苏菲校订了托勒密《至大论》中的恒星表。此图中非常醒目地显示了仙女座星云（鱼嘴前方），这一星云可以被肉眼看见，但必须在理想的观测条件下。后来在公元17世纪它被西方人用望远镜重新发现。图中的鱼代表一个前伊斯兰时代阿拉伯的图形。

乌鲁伯格天文台最大的成就是天文表，其中包括有一千多颗星的恒星表。恒星表中许多恒星的位置是撒马尔罕的天文学家们测定的，他们使之成为中世纪重要的星表之一。乌鲁伯格于公元1449年被谋杀，当时天文台正要度过它的30岁生日。随着主人的去世，撒马尔罕天文台的观测工作也就寿终正寝了。

左页图：天文学家们在伊斯坦布尔天文台的"小天文台"中。塔奇丁可能就是在星盘旁边的那个人（上部右方）。在顶部右侧我们看到放书的书架，而中部的桌子上放着时计（沙漏——译者注）、各种几何仪器，还有的看起来像是浑仪，甚至一个机械钟（最右侧）。据画中描述，天文学家们正在使用象限仪和另一种仪器进行观测，还有罗盘和固定三角架。天文学家们正在讨论。在画面底部中央是一架地球仪。

阿拉伯的行星天文学

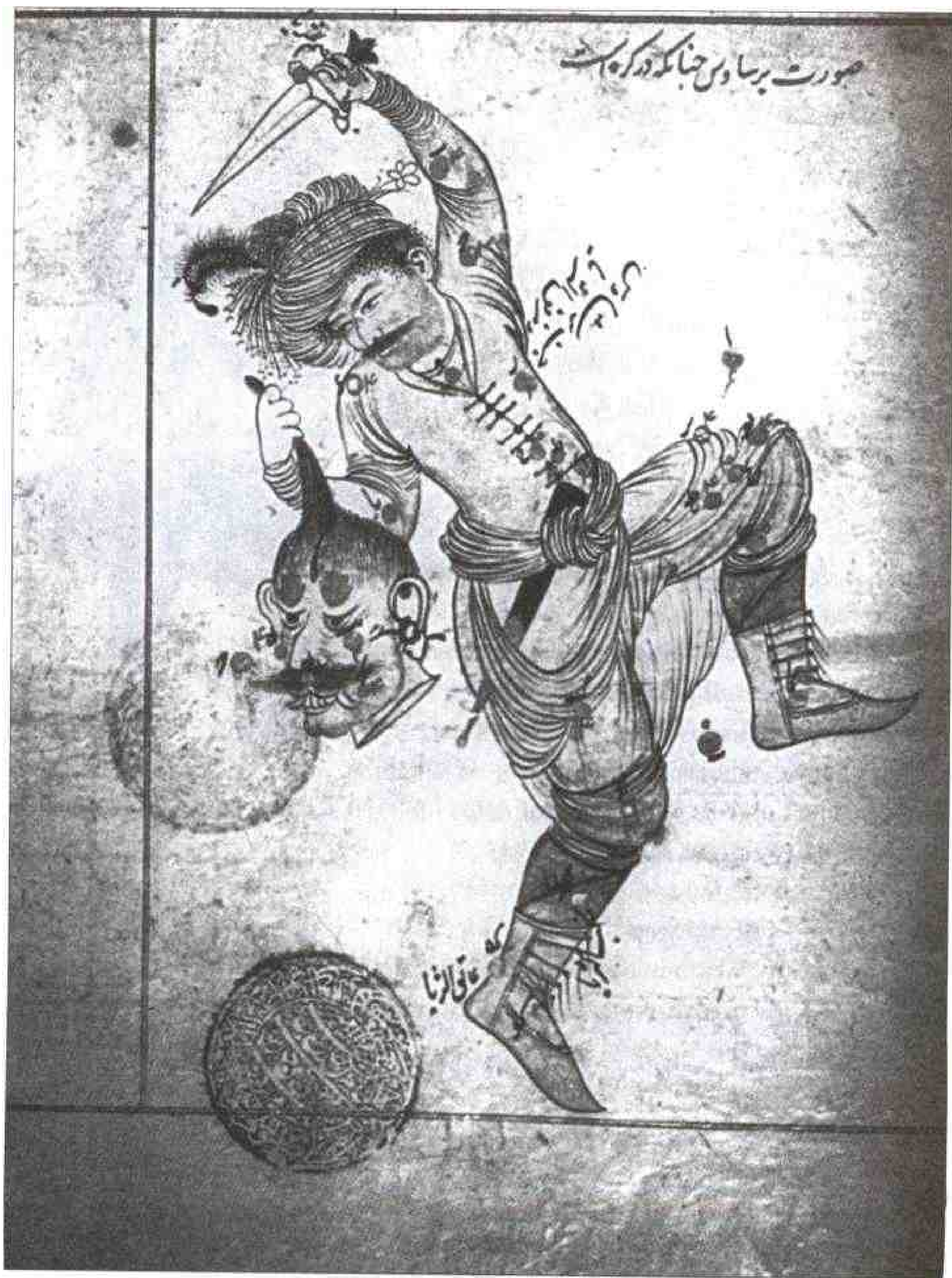
巴格达智慧宫的花拉子模，提供了一个早期积尺的例子。其来源是公元770年左右一个印度政治使团带到巴格达的梵语天文学著作，积尺中使用的大部分参数和计算程序，都来自印度天文学。一个后来的天文学家提供的版本，由巴思地方的阿德拉德（Adelard of Bath）在公元12世纪译成拉丁文，这成了印度方法

① 注意，这里所说的"六分仪"和后来航海用的"六分仪"是不同的仪器，尽管前者名字也叫sextant。而乌鲁伯格在撒马尔罕天文台上建造的这架仪器，本质上仍然是阿拉伯天文学家喜欢使用的墙象限仪，并非欧洲古典的六分仪。——译者注

到达中世纪西方的途径之一。

许多阿拉伯天文学家尊敬托勒密，但是修订了他的参数，穆罕默德·巴塔尼（Muhammad al-Battani，约公元850-929年）就是其中之一，他在幼发拉底的阿尔拉卡（al-Raqqa）度过了绝大部分学术生涯。他的《积尺》，包括对太阳相对于地球的周年视运动轨道的一个改进，经过穆斯林的西班牙，传到了基督教世界。印刷术的发明使此书传播得更广，哥白尼对此书颇多引用，在《天体运行论》中哥白尼提到此书作者的名字不下23次。

与此相反，另一个阿拉伯天文学家的工作则未被中世纪的西方所知，即优努



苏菲（Abd al-Rahman al-Sufi）所绘的英仙座。这看来是描绘在一个天球仪上的；这是将天空中群星模拟显示的一种方式。在被切下的美杜莎的头上，最亮的恒星标明为“恶魔星”（Algol，即英仙座β星，中文名“大陵五”——译者注），是“恶魔之首”（亦即托勒密的“戈耳戈之首”）的缩略语。大陵五是一颗变星，19世纪被西方人认出（见192页），但是没有令人信服的证据能够表明，早期“恶魔”（demon）这一措词意味着托勒密和他的伊斯兰继承者们已经知道了这颗恒星的变星性质。

斯（Abd al-Rahman ibn Yunus），他在公元10世纪后期生活于开罗。他编纂了一部重要的天文学手册《哈基姆积尺》（Hakimi Zij），他在前言中给出了百余项观测，大部分是交食和行星的合（指两个以上的行星出现在天空同一个视方向上——译者注）。他的授时表，直到19世纪还在开罗使用。另一方面，公元11世纪由摩尔人天文学家萨迦里（al-Zarqali，拉丁名字是Azarquiel）编成的《托莱多天文表》（Toledan Tables），则很早就得到翻译并广为流传；它们成为公元14世纪早期《阿尔方索星表》（Alfonsine Tables）的蓝本，在这方面支配着拉丁世界的天文学，直至文艺复兴。

对《至大论》中的恒星表的首次修订，起因于一个天文学家苏菲（Abd al-Rahman al-Sufi，公元903–986年），他曾在波斯和巴格达工作。在他的《恒星星座之书》（Book on the Constellations of Fixed Stars）中，他给出了改进过的星等和阿拉伯文的定义，但是恒星坐标和它们的相对位置（经常是不准确的）则一仍其旧。这是伊斯兰天文学家常见的通病：缺乏观测。他们致力于将数学应用于天文学，但他们的工作场所经常是书房而不是开放的星空。所以他们几乎完全没有注意到公元1054年在蟹状星云出现的超新星爆发；阿拉伯文献中只有一处提及此事。他们有一种用途广泛而且便于观测和计算的仪器，即星盘（参见58–59页），但是对于大部分任务来说，一次单独的测量就足够了。毕竟，星占学依赖于对行星位置的推算，而《至大论》对此已经提供了极好的基础。

托勒密天文学的不完备性，通过比较《至大论》中抽象的几何模型和他在《行星假说》（Planetary Hypotheses）中描述的关于宇宙的物理学观点，就可显现出来。早在公元9世纪，一个在巴格达工作、说叙利亚语的学者库拉（Thabit ibn Qurra，公元836–901年），已经注意到了这方面的矛盾，到公元10世纪的文献中，则不断出现主题为对托勒密"怀疑"（shukuk）的作品。尽管试图在伊斯兰天文学家中寻找一个挑战亚里士多德—托勒密地心宇宙基础的叛逆者是徒然的，但是在接受托勒密的行星模型时，确实有些哲学上的格格不入，这在古代已经如此，在基督教的中世纪和文艺复兴时代还将如此。最明显的目标是托勒密关于"对点"（参见第37–38页）的设计，这一设计使得行星运动有时慢下去有时快起来，粗暴地冒犯了希腊天文学最基础的原则——天体运动必须是匀速圆周运动。偏心（参见第33页）使得行星的圆周运动不再以地球为中心是令人反感的，甚至本轮（参见33–34页）也是与亚里士多德主义相冲突的。

关于偏心和本轮的争论（主要发生在伊斯兰的西班牙），基本上是在哲学家和数理天文学家之间进行的。哲学家方面一个有影响的发言人，是伊斯兰最伟大的亚里士多德学说的解释者，安达卢西亚人拉什德（Andalusian Muhammad ibn Rushd，公元1126–1198年），他在拉丁世界为人所知的名字是Averroes，或者干脆就是"评注者"（Commentator）。他承认托勒密模型的预言确实能够和观测到的天体运动相符合，但是在他看来，只有同心球层才能组成真实的宇宙。大部分数理天文学家认识到，在这一原则下尝试行星模型是毫无希望的，但是拉什德的同时代人和追随者，安达卢西亚人比特鲁基（Abu Ishaq al-Bitruji，拉丁名字是Alpetragius）却有勇气尝试。当然，结果很不理想是在意料之中的；以土星为例，它偏离黄道竟达26°之多，而正确的值最小只有3°。然而在公元13世纪早

期他的著作被译成拉丁文之后，他在自然哲学家中间也获得了某些赞同。

在改革行星模型的设计方面，做出最大努力的是东方数理天文学家们，他们工作的动力是理论方面的思考，而不是改进天体位置推算的实际需要。这些拒绝托勒密"对点"的天文学家之一是在开罗工作的哈桑（Ibn al-Haytham，公元965—1040年），后来在拉丁世界以阿尔哈增（Alhazen）知名。在他的《论世界之结构》（On the Configuration of the World）一书中，他试图改造《至大论》中的行星模型使之具有物理上的实在性。他视天空由同心球壳层所形成，在各层的厚度空间中还有一些别的壳和球。用这种方法，他试图为托勒密模型中的每一个简单运动设计一个球体。公元13世纪他的著作被翻译介绍到卡斯提尔王国，进入"博学者"国王阿尔方索（Alfonso）的宫廷，不久又从卡斯提尔语译成拉丁文。为行星运动的每个成分设置独立天球的观念，后来通过乔治·普尔巴赫（Georg Peurbach）的工作而在公元14世纪后期得到流行。

托勒密的"对点"即使在实测天文学家中间也足以引起疑虑。公元13世纪马拉盖的天文学家图西，在他的著作《备忘录》（Tadhkira，即Memorandum）中，成功地设计了令人满意的替代品，只使用匀速圆周运动：每个行星运动的模型增加了两个本轮，其复杂性看来是一个值得付出的代价。

偏心，尽管冲突没有"对点"那样严重，但仍然呈现为一个对亚里士多德教义的冒犯。试图净化托勒密模型中所有令人反感的性质，代之以能够从哲学上和实测上同时可被接受的模型，这方面最出色的努力，是公元1350年左右由舍德（Ibn al-Shatir）做出的，他是大马士革倭马亚（Umayyad，有时也译作"伍麦叶"，本是著名的阿拉伯王朝的名称——译者注）清真寺的穆瓦奇特。舍德的月亮运动模型避免了托勒密模型中必然导致的月亮视直径的大幅度变化（参见本书第39页）；他的太阳运动模型基于对太阳视直径的新观测；他所有的行星模型都不仅从"对点"中而且也从偏心圆中解脱了出来。固然，他不能没有本轮；但是单个恒星的存在已经显示，亚里士多德在坚持天界全部由同一物质构成这一点上走得太远了，所以即使是亚里士多德主义的思考，对可能存在本轮这一点上也要网开一面。

舍德虽然不是以阿拉伯文写作的最后一个数理天文学家，却代表了一个持续了500年之久的运动的顶点。但是阿拉伯天文学家可以影响行星理论未来进程的时刻已经过去了。拉丁世界翻译阿拉伯著作的狂热早已衰落；拉丁世界发展着他们自己的天文学传统，图西和舍德的著作看来在西方根本不为人们所知。

但如果是这样，历史学家将不得不接受一个奇怪的巧合，舍德的工作在现代被重新发现，人们认识到他所采用的几何设计与后来哥白尼所采用的很相似，而哥白尼同样对托勒密的"对点"很反感。哥白尼采取激进的步骤将地球变成一个行星，但当发展具体的模型时，他所面临的许多问题不再像他的前辈们当时所面临的那样极其困难了。在《要释》（Commentariolus）——以手稿形式流行于16世纪早期的关于他的日心学说的初步纲要——中，哥白尼安排了一个与舍德等价的设计，以消除"对点"并产生地球轨道的复杂变化。而在充分发展了的《天体运行论》（De Revolutionibus，1543年）中，哥白尼又回归到偏心轨道，但他使用的日心模型，等价于图西在波斯的马拉盖天文台所发展的模型。这些阿拉伯著作的拉丁译本并未被发现，迄今也不知道有任何关于这些著作的拉丁文报道。作

一份现藏牛津的手稿中的图示，其中解释了公元14世纪舍德（Ibn al—Shatir）所设计的月亮运动模型。这是一个使用双本轮的例子，旨在避免他认为在原则上无法接受的托勒密的“对点”。通过舍德所选定的这些圆周的半径和旋转速度，不仅月亮在天球上的运动可以被很好地再现，而且月亮与地球距离的变化也适中了。这避免了托勒密月亮运动理论中的一个引人注目的缺点，即月亮与地球之间距离的变化（因而也就导致从地球上看到的月亮视直径的变化）是实际情况的两倍。

为公元1453年君士坦丁堡陷落的后果，有一些图西作品的希腊文译本在意大利被发现[①]，哥白尼于公元1496－1503年在意大利进行研究，并获得了关于希腊文的知识。但是，他是否将他的取代“对点”的技巧归功于别人，他是否独立地发展了他的方法，这些问题至今都悬而未决。

①这里是指拜占庭帝国首都、号称“千年之城”的君士坦丁堡（今伊斯坦布尔）于公元1453年被土耳其人攻陷，许多拜占庭学者带着珍贵书籍逃往意大利。——译者注

星盘

在中世纪，最成熟（而且从历史上看最重要的）天文仪器，就是将天球坐标投影在平面上的星盘(planispheric astrolabe)。这是星盘的四种形式之一，其余形式中的两种，直线的和球体的非常罕见，剩下的一种水手用的星盘（参见第78页），是海上用的比较粗糙的工具，看来是到中世纪末期才被发展起来。

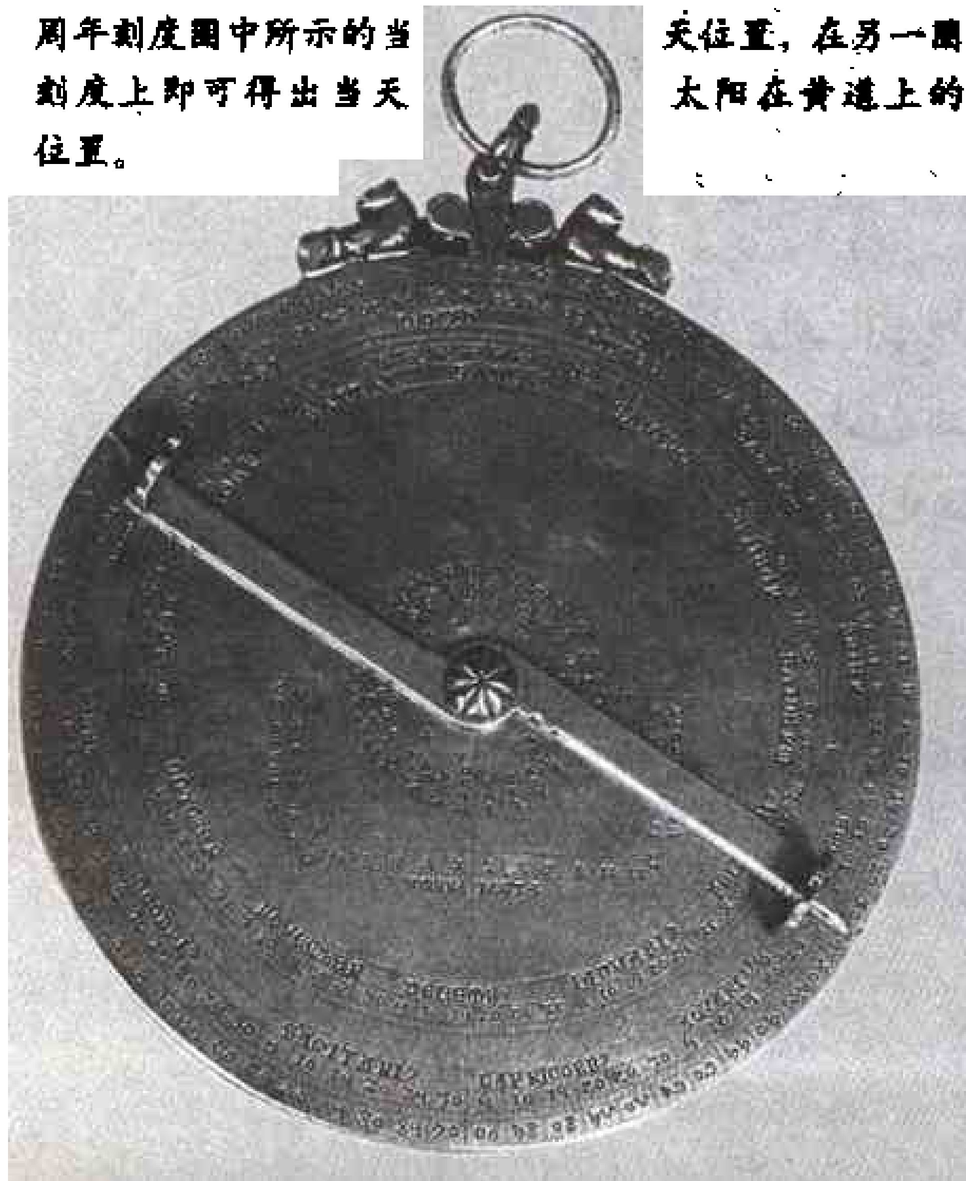
星盘的出现可以追溯到古代希腊，在伊斯兰世界臻于完备（在那里它的流行一直保持到现代），后来又在西方得到进一步的精致化。这种仪器的基本部件是一个黄铜圆盘，可以用一个环悬挂起来。圆盘的背面是基本的观测仪器，其上固定着一个观测条，或者称为"alidade"，观测条可以绕着圆盘中心的一个轴旋转，用来测量天体的地平高度。观测者只需简单地将星盘悬挂起来，这样它就垂直竖立了，沿着观测条看并让观测条指向要测量的天体，就可在圆盘边缘的刻度上读出该天体的地平高度。

在西方式的星盘背后有两圈刻度，共同给出了一年中每一天太阳在黄道（即太阳相对于恒星背景运行的轨迹）上的位置。一圈刻出一年中的每一天，另一圈给出对应的太阳位置；观测条可以被用来指出对应的点。

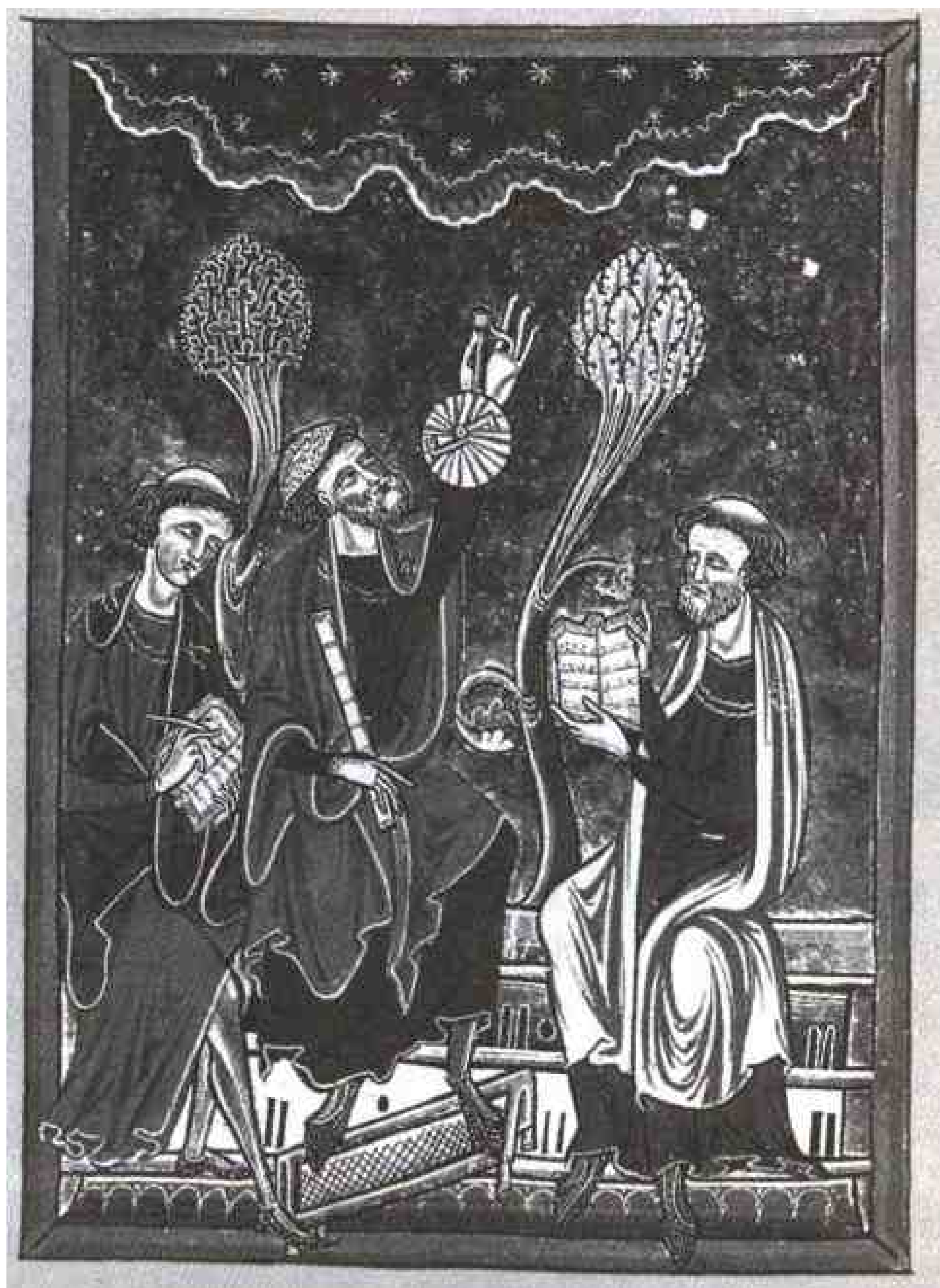
星盘的正面是一个计算装置，包括了天球（独立的恒星、天球黄道、天球赤道以及天球上的回归线）和当地坐标系统（地平纬度、地平经度——通常从正南方开始度量），使用者可以由此测量天体的位置。

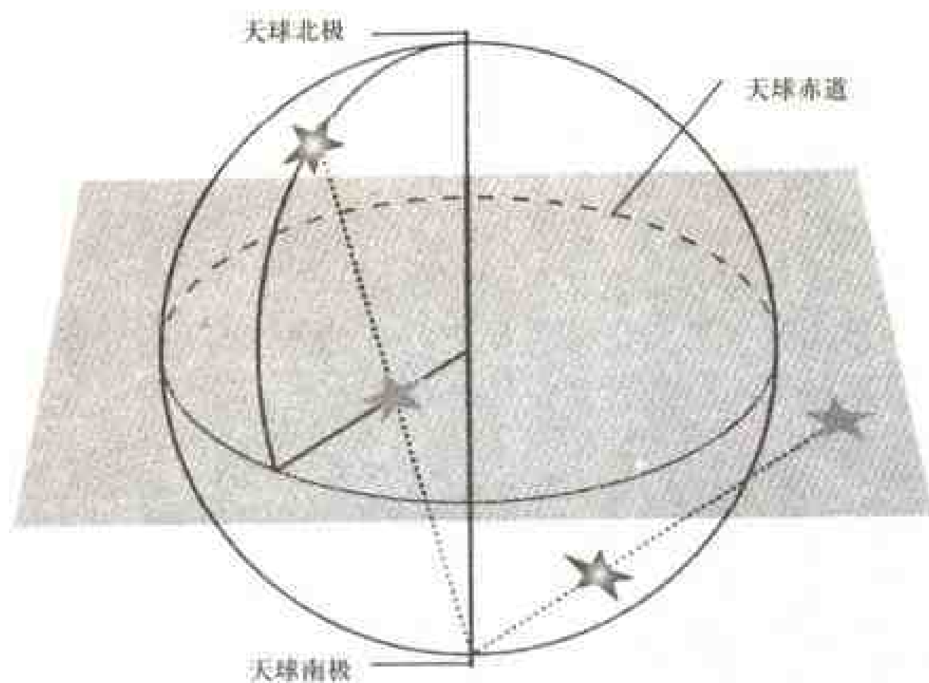
要制作一个星盘，我们需要将天球投影到一片黄铜圆盘上。幸运的是，从几何学我们知道如何建立天球上的点和一个（无穷大的）平面上的点之间的投影，所以天球上的每一个点，都可以精确地投影到平面上。我们简单地想象从天球南极到天球上任意某一点之间的连线，其投影的点就是这一连线交截一个包含天球赤道的平面的位置。这样的一个投影非常有价值并且有着令人惊奇的特性：在弯曲的天球球面上的角度，经过投影不会改变，所以球面三角的问题可以转换为容易处理的平面三

一个星盘的背后。观测者利用顶部的环将星盘悬吊起来，以观测条瞄准一个天体，然后读出最外圈刻度所示的角度，就测量出该天体的地平高度。观测条也能用来确定此时太阳在黄道上的位置：使用者将观测条对准周年刻度圈中所示的当天位置，在另一圈刻度上即可得出当天太阳在黄道上的位置。



公元13世纪的法兰西人在用星盘进行观测。





星盘的正面是一个包括天球赤道的平面的黄铜复制品。在这个平面上我们可以从天球南极对天球进行投影。在天球南极与天球的任意一点之间划一根直线，那么天球上这一点的投影就是这根直线交截上述平面的那个点。天球的赤道，因为就在上述平面内，所以它的投影就是它的自身。天球北半球的一个点（或一颗恒星，例如图中最左侧那个星号），其投影在天球赤道圈以内，而南半球的一个点（或一颗恒星）其投影点就要落在赤道圈之外了。

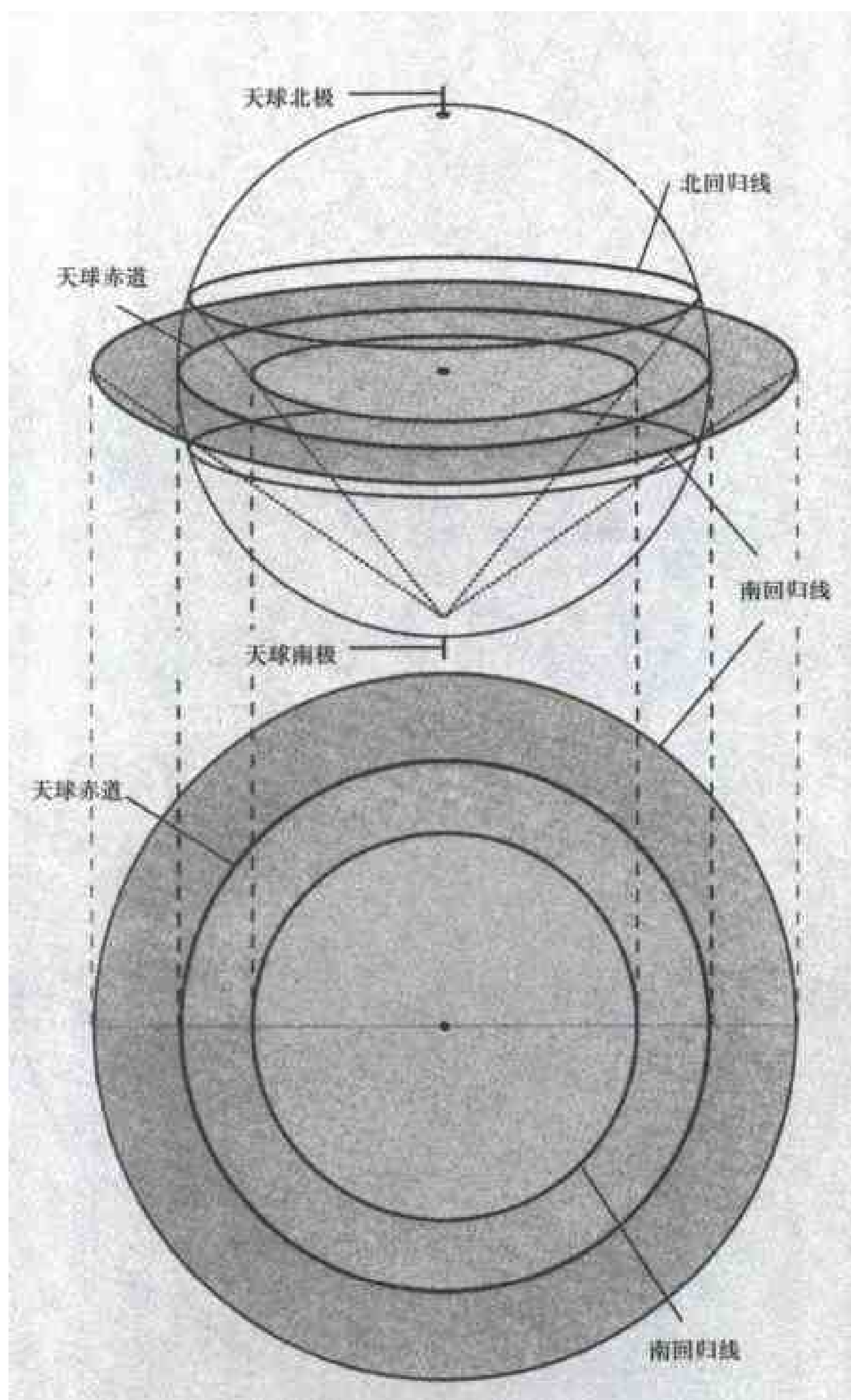
角问题。

我们星盘中的黄铜圆盘，就是上述包含天球赤道的平面的一个物理上的复制品，我们将天球投影在（也就是描绘在）这个圆盘上。不幸的是，圆盘的尺度是有限的，这意味着在实际操作中，不可能将全部天球投影到这一圆盘上。但是，正如穆斯林和基督教的使用者从未见过靠近天球南极的天空，在星盘上没有反映南天球也就无伤大雅。这就是以南天极作为投影中心这一选择背后的理由。

黄铜圆盘中心所对应的是天球北极。围绕着北极，有三个同心圆，分别代表北回归线、天球赤道和南回归线。我们选择南回归线作为圆盘最外面的边界，这样南回归线以南的天空在星盘上就得不到反映了。

使用者测量的是星盘观测条所指示的天体的地平高度，这是一个坐标体系中的一个角度，该坐标体系中地平线是0°，天顶则是90°。为了使我们的观测比较方便，地平高度的等高圈（可以是0°、10°直至90°）必须在投影中被沿着地平经度的等经度圈表现出来。然而问题是，这些圈取决于观测者进行观测时所在地的地理纬度，然后才能进行投影。解决的办法是为星盘提供一系列的圆盘，每个圆盘上刻有适应不同纬度的投影坐标环。这些被称为“climate”的圆盘一个一个地重叠在一起，使用星盘观测的人可以很方便地选择最适合观测多点地理纬度的圆盘，并将其置于最上面来使用。

这样，每个我们已经注意到的投影特征都被确定下来了。但是我们现在需要将天球上一颗颗独立的恒星（当然不包括那些太靠南方的星）进行投影，由于天球是在旋转的，投影也必须旋转。如果中世纪已经有透明塑料可供使用，那毫无疑问，被投影的恒星可以刻在一个

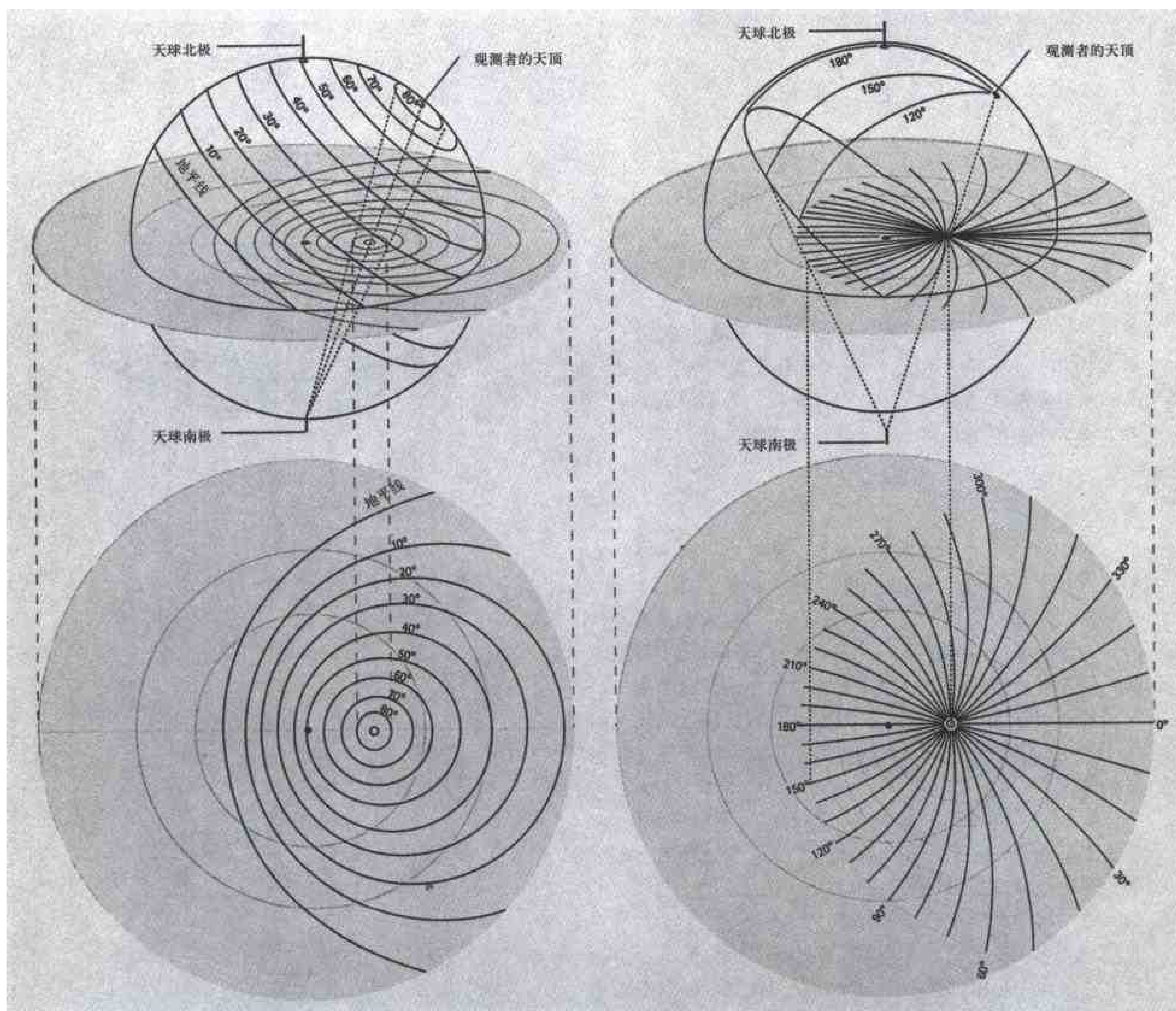


五个步骤之一：星盘正面的制作：天球北极、回归线和天球赤道在黄铜圆盘上的投影。由于星盘的尺度有限，且靠南方的天区没有什么实际上的意义[1]，所以南回归线以南的天空在星盘上得不到反映。

[1] 世界上几乎所有的古代文明都在北半球，所以南天星空很晚才开始被人类认识，对于生活在古代的人们来说它确实没有什么实际意义。——译者注

透明的圆盘上，该圆盘能够以代表天球北极的中心点为轴转动，使用者透过这个透明圆盘就可以读到下面黄铜圆盘上所刻的坐标环。作为一个替代（透明圆盘的）方法，中世纪的星盘制造者采用另一个黄铜圆盘，称为"网环"（拉丁文"rete"，源于阿拉伯语"蛛网"——译者注），在其上标出天球上重要运动特征的投影（太阳在黄道上的轨迹和最重要的恒星的位置），然后他尽可能多地挖去这个圆盘的其余部分，从而使得下面一个圆盘上的坐标得以显露出来。

天空的旋转：用现代的说法，天球只有一个自由度。因此，只要有一个单一的观测事实，就足以确定观测时所有恒星在天空中的位置。如果有一个天文学家，比如说，他用他的星盘背面测量了天狼星的地平高度（还要确定该恒星是在升起还是降落途中），那么接下来他就无



五个步骤之二：投影等高度圈，这是观测者当地的地平坐标系的一部分。角度范围是从地平线的0°到天顶的90°，天体的地平高度可以在星盘的背面直接测量出来。在图中观测者的地理纬度被假定为北纬50°，但是一个星盘有一系列刻有类似投影而适应不同地理纬度的黄铜圆盘。

五个步骤之三：投影等地平经度圈（地平线上的方位角）。在星盘上，地平经度通常沿着顺时针方向从正南方开始度量，尽管也有某些制作者遵从别的约定。这也是观测者当地的地平坐标系的一个组成部分。等地平经度线汇聚到当地天顶。

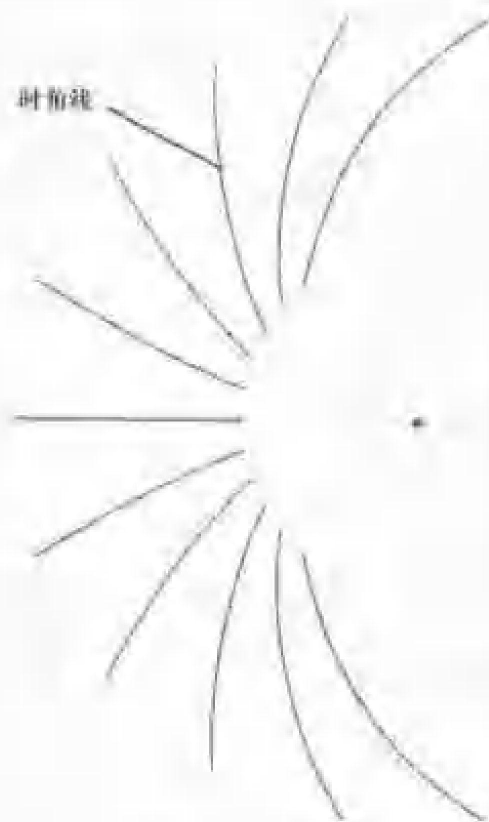
需劳神费力了。他只需转动网环，直到天狼星的投影在下面那个圆盘上所刻的地平坐标中位于他刚才测得的地平高度。至此他不仅可以知道天狼星此刻位于何方，同时也知道了所有恒星此刻位于何方。他可以确定此刻众星在天空中的位置，还可以告诉你哪颗恒星正要升起，哪颗恒星刚刚落下，如此等等。

星盘的一个基本用途是测定时间。星盘背面的两组刻度是告诉使用者太阳当日在黄道上的位置的，所以他知道应在被投影的黄道上的何处标出太阳的位置。一个西方式的星盘，正面有一圈刻度是将圆周均分为24份，代表天球完成旋转一周所需的时间（伊斯兰星盘没有这一设计）。一个标杆让使用者可以根据太阳的投影位置读出时间。换句话说，星盘是一个24小时的时钟。确定时间只需一个简单的观测——在白天是观测太阳，在夜晚是观测某颗恒星。

另一个用途，星盘可以用来指出某个天文事件发生的时刻。例如，如果使用者希望知道何时日出，他只需旋转网环，直至太阳处于地平线的最东部，然后用标杆读出对应的时刻——这就是日出的时刻。

这些只是这一非凡仪器用途中的很少的几种。在伊斯兰和基督教的中世纪，星盘对于天文学、星占学、星占医学来说，都是最基本的仪器。





五个步骤之四：“时角线”被加到左侧，与基本固定环以及形成观测者当地地平坐标系统的环的投影相组合。“时角线”用来指示被划分为12“小时”的白昼时间和被划分为12“小时”的夜晚（通常与白昼的“小时”不同）[①]时间中的位置。

五个步骤之五：将旋转的网环添加到圆盘上去，根据前面的步骤一至五，圆盘上已经刻上了时角线，以及基本固定环和形成观测者当地地平坐标系统的环的投影。在网环上有完整的太阳周年视运动轨道——黄道的投影，还有指示各个明亮恒星位置的“点”。观测之日太阳在黄道上的真实位置可以依靠星盘背面的刻度得知。如果标杆（在上图所示的星盘中，标杆的一端断了一截）瞄准了太阳在黄道上的位置，那么此时它就好像是一个钟面为24小时的时钟的指针。因此许多西方星盘在外缘有一圈24等分的时间刻度。[②]

（江晓原译）

① 这是由于一年中不同季节时，昼、夜的时间长度并不相等，而且其比例随着季节和地理纬度的不同都会有变化。夏季白昼长而夜晚短，冬季则白昼短而夜晚长，纬度越高这一现象越明显。星盘上为了能体现昼、夜长度之不相等，又要迁就一昼夜24小时的传统，所以对昼、夜的小时采取了不同定义。——译者注

② 图中这具星盘，是公元14世纪之物，原物现藏牛津大学默顿学院。关于这具星盘以及星盘的若干有关历史情况，可参阅江晓原著：《历史上的星占学》，上海科技教育出版社，1995年第1版及以后各版，158－162页。——译者注

第四章 中世纪拉丁天文学

公元前2世纪罗马士兵征服了希腊城邦，但是希腊文化却征服了罗马人的思想。在古代，用拉丁文写成的天文学著作几乎一点也没有我们现在讨论的特征，这是因为在“罗马帝国统治下的和平时期”，受过教育的人使用的语言都是希腊语；在关于天文学的作者中，保留下来的拉丁语作品，主要是低层次的带有说教色彩的东西。

和平时期的最终崩溃开始于公元15世纪下半叶，从那以后，西欧许多地区的日常生活开始逐渐不稳定起来。对于少数仍然非常在乎学术著作的人来说，接触这些作品变得更加困难，能阅读他们所使用的希腊文的人已经寥若晨星。

有一位学者下了很大工夫，试图及时将希腊哲学名著译成拉丁文：博埃修斯（Anicius Manilius Severinus Boethius，约公元480－524/5年），一位在罗马的哥特王国的高级官员。他最大的雄心是尽可能多地翻译和评价亚里士多德及柏拉图的著作。但遗憾的是，由于他对于不公正拒绝保持沉默，激怒了他的主人西奥德瑞克（Theodoric），先是被严刑拷打，然后被判处了死刑。他的伟大的工作几乎没有展开，但他所做的工作还是被证明是很有意义的。特别是，他翻译和解释了许多希腊关于逻辑的著作，并且将它们和西塞罗（Cicero）等拉丁作家的逻辑学著作收集在一起。这就给生活在后来几个世纪和快乐时期的学生们提供了一个世俗作品的文集，使得他们可以用来进行比较，并揭示了在这个过程中如何展示心灵的独立。逻辑将在中世纪大学成为一个困惑，大部分人遇到的教师关心亚里士多德的球层或托勒密的“对点”，更甚于关心由此构建出来的行星模型的实效。

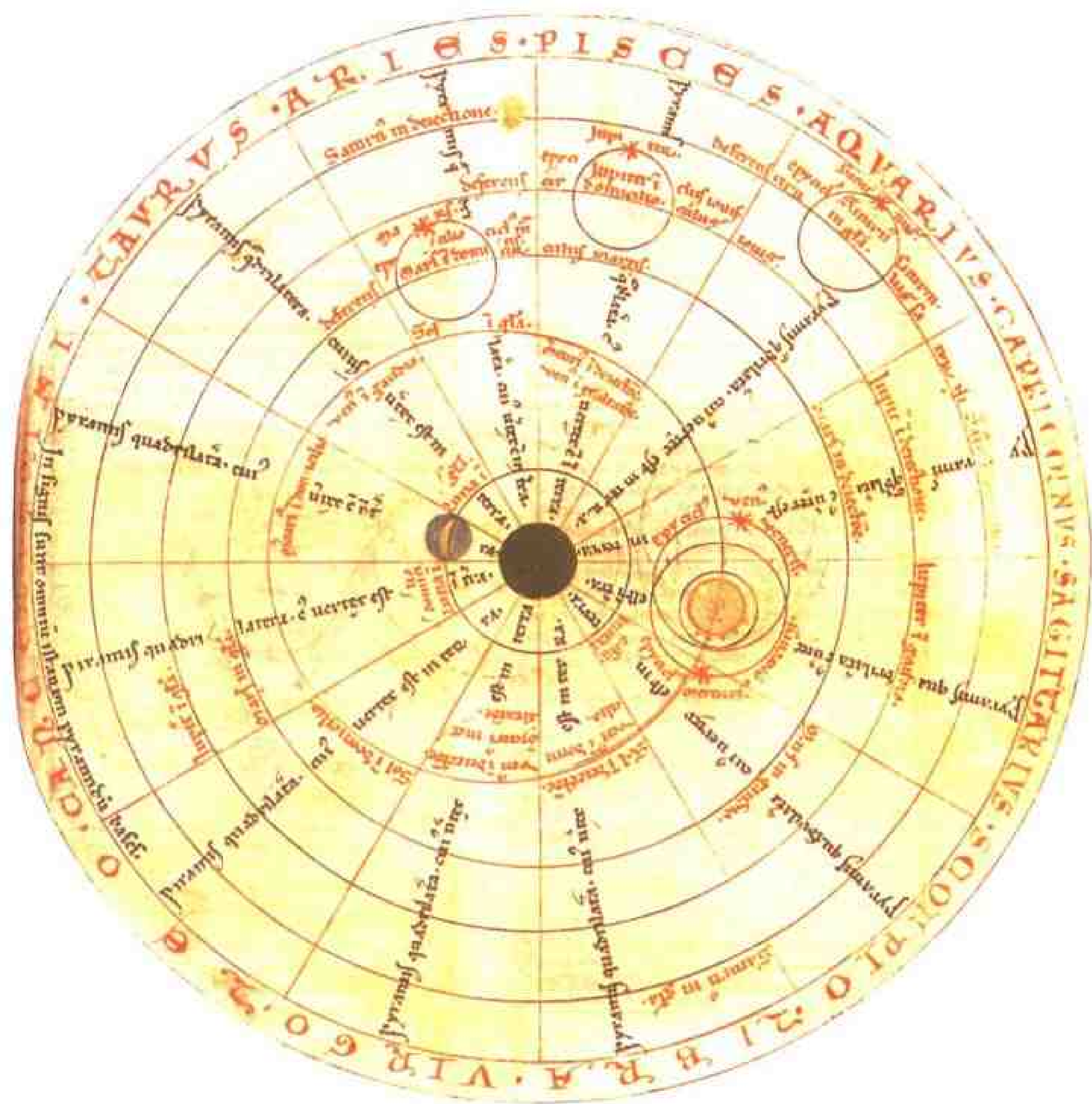
通过自己的作品和自己的翻译及注释，博埃修斯（Boethius）将已有的数学研究传统整理成后来标准的大学通用模式“四艺”（quadrivium）：算术学（关于离散量的抽象理论）；和声学（同样的理论在自然中的应用）；几何学（关于连续量的抽象理论）；天文学（同样的理论在自然中的应用）。然而他自己关于四艺的著作，保留下来的主要是关于算术学与和声学，而不是关于天文学的。

“黑暗”时期

关于中世纪的一个定义，是从罗马陷落到君士坦丁堡陷落（公元1453年）这段时间，另一个是指极少有学者能懂希腊语的时期。由于那个时代对希腊语无知是无关紧要的，因此希腊文的原著很少被接触到。很遗憾，即使是经过翻译的希腊作品也很难得到。除了博埃修斯的遗著外，对希腊文著作最有意义的翻译应归功于卡西迪奥（Calcidius）（我们无法肯定他是生活在公元4世纪还是5世纪，这正是那个时代混乱的表现）。他将柏拉图的宇宙学神话《蒂迈欧篇》（Timaeus）的三分之二翻译成了拉丁文，还写了冗长的、很有影响的评注。值得注意的是，即

使到了中世纪后期，整个卷帙浩繁的亚里士多德文集已被翻译成拉丁文，并且在学术界占主导地位的时候，《蒂迈欧篇》的卡西迪奥（Calcidius）版本仍然是关于柏拉图对话最有影响的不可多得之作。

在公元后第一千年的中期，以拉丁文写成的著作，成为关于长期研究的急需陈述的证词。这个时期最好的关于天文学的论述出现在迦太基人马丁内斯·卡佩拉（Martianus Capella of Carthage，约公元365 – 440年）的著作《语言学和墨丘利的婚礼》（The Nuptials of Philology and Mercury）中。这部著作是一个天堂婚礼的寓言，在那里七个女傧相给出了一个关于天文学和其他文科六艺的纲要[1]。特别是，这部作品中包含了一个关于现在常常归于本都的赫拉克里德（Heracleides of Pontus，约公元前390 – 前310年）名下的理论的叙述，即金星和水星总是出现在太阳的附近，绕太阳旋转，而金星、水星和太阳这三个又是围绕地球进行旋转的。在中世纪，卡佩拉的传统和来自普林尼（Pliny）的说法混合在一起，有时候根据图所显示的结果，水星和金星的轨道与太阳轨道奇怪地相交，



公元13世纪的一份手稿，显示马丁内斯·卡佩拉（约公元365—440年）系统的一个奇特的变化：金星和水星被太阳带着绕地球旋转，但是它们绕太阳转动的轨道是相交的。注意三个外行星（火星、木星和土星，在图中的外侧）有着通常的托勒密本轮。

[1] 中世纪西方有“文科七艺”，分别为：语法、修辞、逻辑（此三者有时称为“三艺”），算术、几何、音乐、天文（此四者有时称为“四艺”）。此七艺与今日通常所言“文科”者并不相同。——译者注

Publius
Cornelius

Scipio
Affricanus
Publij iunioris

Corneli
Scipio iunior

Paulus scipio
pater publij

Primum mobile

Spera lune
Spera mercurij
Spera veneris
Spera solis
Spera martis
Spera Jovis



这两颗行星又绕着太阳旋转。无论如何，图文史料足以表明，在中世纪大学中总能听到不同的声音，而马丁内斯·卡佩拉常被人们引用说是得到哥白尼赞同的（虽然这多少有些令人迷惑）。

马克罗比乌斯（Ambrosius Theodosius Macrobius）来自北非，生活在公元5世纪早期，是拉丁作家西塞罗《西庇阿之梦》的评注作者。在评注中他有机会解释了起源于柏拉图和毕达哥拉斯的宇宙理论，在这个理论中，数是一切的基础。他的评注同时也综合了一个当时流行的天文学手册。一个球形的地球在球形宇宙的中心，环绕着它的是七颗球形的行星，再外面是布满恒星的天球；这个旋转着的天球带动围绕它的行星每天自东向西运动着，与此同时每个行星也有着相反方向的运动。意味深长的是，马克罗比乌斯的理论使行星的次序显得模糊不清，这是因为他的材料来源——柏拉图和西塞罗——关于太阳在七政序列上的位置是不一样的。像马丁内斯·卡佩拉一样，马克罗比乌斯也联系了马卢斯的克拉特（Crates of Mallus，公元前2世纪）的理论：地球被海洋分成四部分，每一部分都有人居住。他也报道了埃拉托色尼关于地球周长的值（参见本书第34页）。

和伊斯兰一样，在基督教界，对一些问题的解答也要求对天有所研究。修道院的僧侣们需要知道在晚上什么时刻该起来集体唱祈祷赞美诗；这常常靠观察星象。在看不到星的时候，修士们就采用更世俗的方法——水钟或有节奏的旋律。更有广泛意义的，是确定复活节的日期：为了和它原初的犹太仪式一致，复活节和春分之后的第一个满月联系在一起，这样它的日期就同时取决于朔望月和回归年。教会的权威人士需要提前几年公布复活节的日期，以使得基督世界的节庆可以在同一天举行。一种可能是，亚历山大里亚的主教邀请了当地的天文学家，作为从巴比伦人传下来的月和年的精确数值的继承者，年复一年地计算春分的日期。而教会权威人士则采取了更为实际的做法，来寻求若干个回归年（足够精确的）与若干个朔望月相等的周期；复活节的日期就能够在这个周期中计算出来，并且能够在以后的周期中简单地重复。从公元3世纪起，试过各种各样的周期，从8年到84年，直到19年的默冬章（参见本书第22–23页），它都被认为是最合适的。19年和235个月只差1天的1/12，因此，这样一个周期和实际情况要12 × 19年或者说超过两个世纪，才相差1天。

关于复活节问题的权威叙述，于公元725年由来自英格兰北部贾罗（Yarrow）地方的修士"可敬者"白德（the Venerable Bede，公元672/673 – 735年）给出。在他的《论时间划分》（On the Divisions of Time）中，他给出了复活节的周期是19 × 28 = 532年。按照儒略历，每4年就有1个闰年（没有例外）。然后就像现在这样，一个给定月中的给定日，其所属的周日，每过一年就要往前1日，遇到闰年时就要往前2日①。因此每4年中，上述周日总是超前5天，4 × 7 = 28年中总是超前5 × 7天或5个星期，因此它是可以重复的。由于19年的默冬章充分解决了复活节与年、月配合的关系，给定月份中的给定周日需要28年才能重复，这样，一个19 × 28年的复合周期就可以满足复活节是星期天的要求了。

左页图：马克罗比乌斯评注的西塞罗（Cicero）《西庇阿之梦》（Dream of Scipio），公元14世纪手稿的卷首插图。地球被置于中心位置，地球上还有罗马和迦太基的建筑。围绕地球的是七颗行星，外面是固定的恒星。有趣的是，银河被显示是由恒星组成的。这种解释在古代曾被人提出过，但直到望远镜发明之前一直没有被确认。西庇阿本人睡在图的下方，其余是西庇阿在梦中遇到的先人们的魂灵。

① 这句话的意思是说，如果2002年7月30日这天是星期二，那么2003年7月30日就必然是星期三，如果遇到闰年就是星期四。原因非常简单：一年有52个星期，则52 × 7 = 364天，而正常年份一年是365天，闰年是366天。——译者注



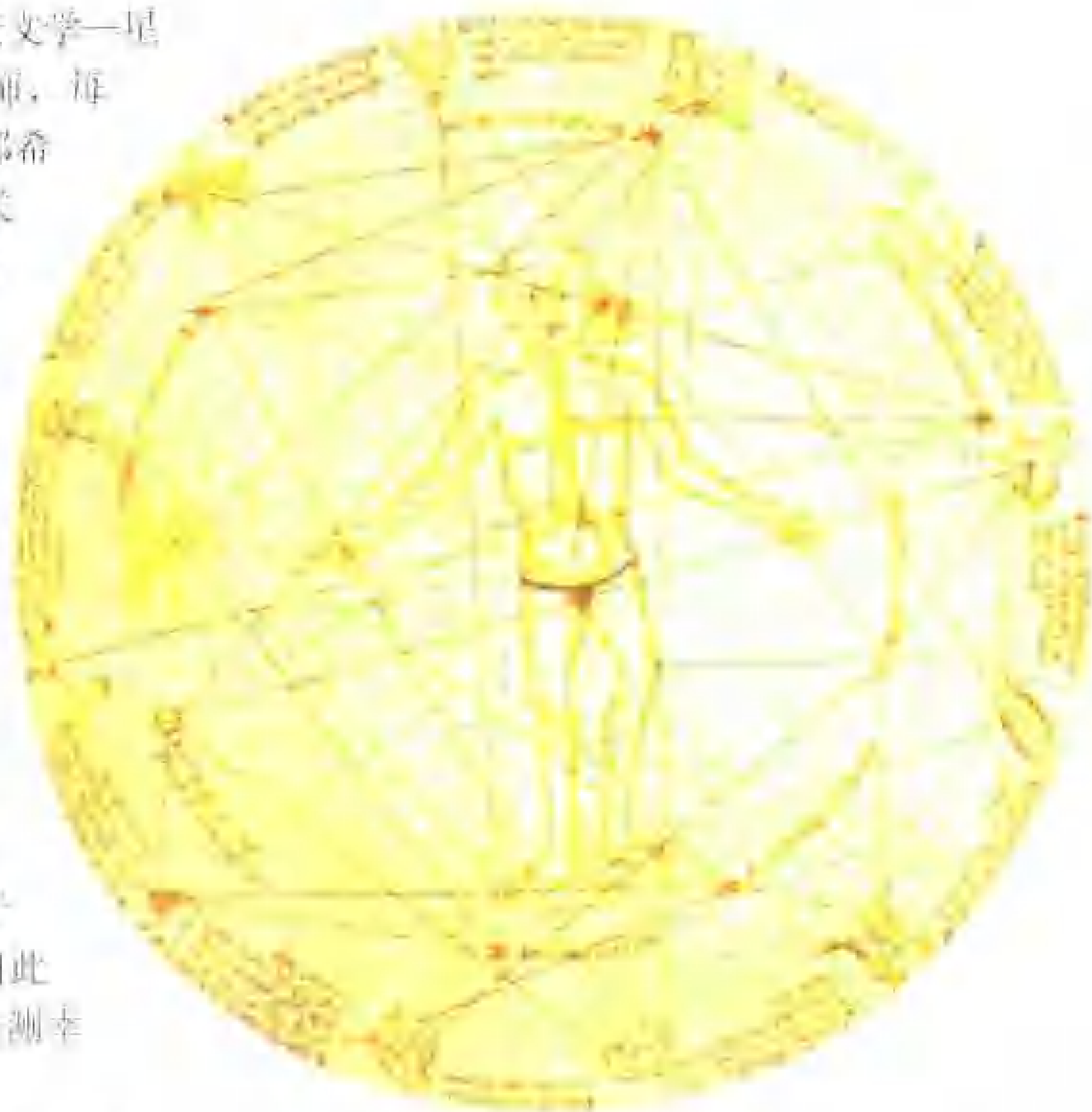
巴耶（Bayeux）挂毯是公元1066年10月诺曼底的威廉(William of Normandy)战胜了英国国王哈罗德(Harold)之后织成的，这一胜利打通了诺曼底征服英格兰之路。图中上方是哈雷彗星，那年春天哈雷彗星出现在英格兰上空。左面的人们正惊奇地看着彗星，而右面的哈罗德正在被告知这个不祥之兆。

天文学在西方的复兴

像马克罗比乌斯这类作者，曾帮助保存下来一些希腊天文学的基本概念，比如地球的球形形状，地球位于球形宇宙的中心位置，七个行星（指日、月和五大行星——译者注）和众恒星的不同之处。但是与成熟的《至大论》相比，公元第一个千年后半期的拉丁天文学实在是太原始了。然而到了公元10世纪，作为与伊斯兰知识中心首次接触的证据，比利牛斯山南面的僧侣们成了传播阿拉伯文化的中心。当时一个有影响的学者访问了西班牙并在那里学习，他就是奥里拉的吉尔伯特（Gerbert of Aurillac，后来教皇西尔维斯特二世，约公元945–1003年）。他回来后掌管了兰斯大教堂的学校，这个学校很快就吸引了许多来自各地的学生。吉尔伯特很可能从西班牙带回了星盘的知识，星盘是一种能进行测量和计算的多功能仪器。当然这种仪器到了大约公元1025年左右在西方也出现了，接着很快关于星盘的两种拉丁论文被奥地利的修士、跛子赫尔曼（Hermannnus contractus，公元1013 – 54年）编辑起来（或者说是从阿拉伯人那里改编了过来）。

星盘使得天文学再次成为数理科学，因为天文学家可以用星盘测量地平线和天体之间的角度。正如在伊斯兰，星占学总是相当流行的，尽管宗教领导人明确表示不赞同。这种流行随着时间的流逝还会加强，最显著的是在1348年到1350年间可怕的黑死病之后发生的混乱中。星占学也不是完全没有理论基础。举例来说，亚里士多德的关于大宇宙（宏观世界）和小宇宙（生物个体）之间的类比，可以使得病人器官的治疗有计划地根据天体位置的有利和不利来进行。大学医学系的

教师中包括了天文学—星占学方面的讲师，每个临床医生也都希望拥有一些有关行星所产生的影响力亦即天宫图所产生的影响力方面的知识。英国诗人乔叟（Geoffrey Chaucer）说，去坎特伯雷朝圣的医生，“是扎根于天文学的”，因此“他能很好地占测幸运之星”。



亚里士多德关于大宇宙（宏观世界）和小宇宙（生物个体）之间的类比，它使医生得以将星占学作为给患者治疗的指南。这张公元15世纪的图，表明了人体各器官与行星及黄道宫之间的对应。

星占学为人们掌握行星运动带来了动力，它远远越出了天文学本身那些乏味无趣的事务。因此，伊斯兰天文学家们编辑的图表和他们使用过的法则及作为这些法则基础的理论——使得在公元12世纪被吸引到西班牙去的翻译者对它们产生了强烈兴趣。伊斯兰退出后留给基督徒的手稿中包括了希腊人和伊斯兰在哲学和科学方面的成就。公元1085年，伟大的文化中心托莱多（Toledo）的陷落打开了了解这些成就闸门。克雷默纳的杰拉尔德（Gerard of Cremona，约公元1114－1187年）是住在那里的翻译者之一，后来他的同伴们列出，有不少于71部的天文学和其他的作品是他翻译的。令人吃惊的是，现代学者们认为，即使是这个书目也并非毫无遗漏。他们相信杰拉尔德还翻译了其它别的作品，包括关于萨迦里（al-Zarqali）的《托莱多天文表》的使用规则（Canons）。这些表被用于西欧多处不同的经度，并取得了巨大成功。它们的有效性刺激了天文学的研究，因为现在计算任何时刻的行星的位置并比较计算与观察的结果都是可能的了。但是在《至大论》本身也能被使用之前，支持这些方法的理论基础仍然保持着神秘状态。此时人们的心灵还是习惯于博埃修斯和马丁内斯卡佩拉的论述，原因是《至大论》一开始难以理解。在西西里，因为此地先后被希腊人、穆斯林和拉丁民族统治过，因此当地的翻译一直在进行着。由于和君士坦丁堡的交流恢复了，所以从那里的图书馆里传入了另一个版本的《至大论》，而且是希腊语原版的。

当古代和中世纪伊斯兰作品的译著，在公元12世纪流传到拉丁文西方当时刚

[illegible] 1995年出版，页184－187。——译者注



在这个15世纪的彩饰画中，月亮被描画成一个站在两个"幸运之轮"上的年轻女人。她的两腿之间是黄道巨蟹宫的符号，这一宫是月亮施展最大影响力的地方。托勒密在他的星占学著作中，指明月亮有潮汐的力量，而其他的作者则认为月亮是产生潮汐的原因。这两者的关系在图中以海景的形式被表示出来。

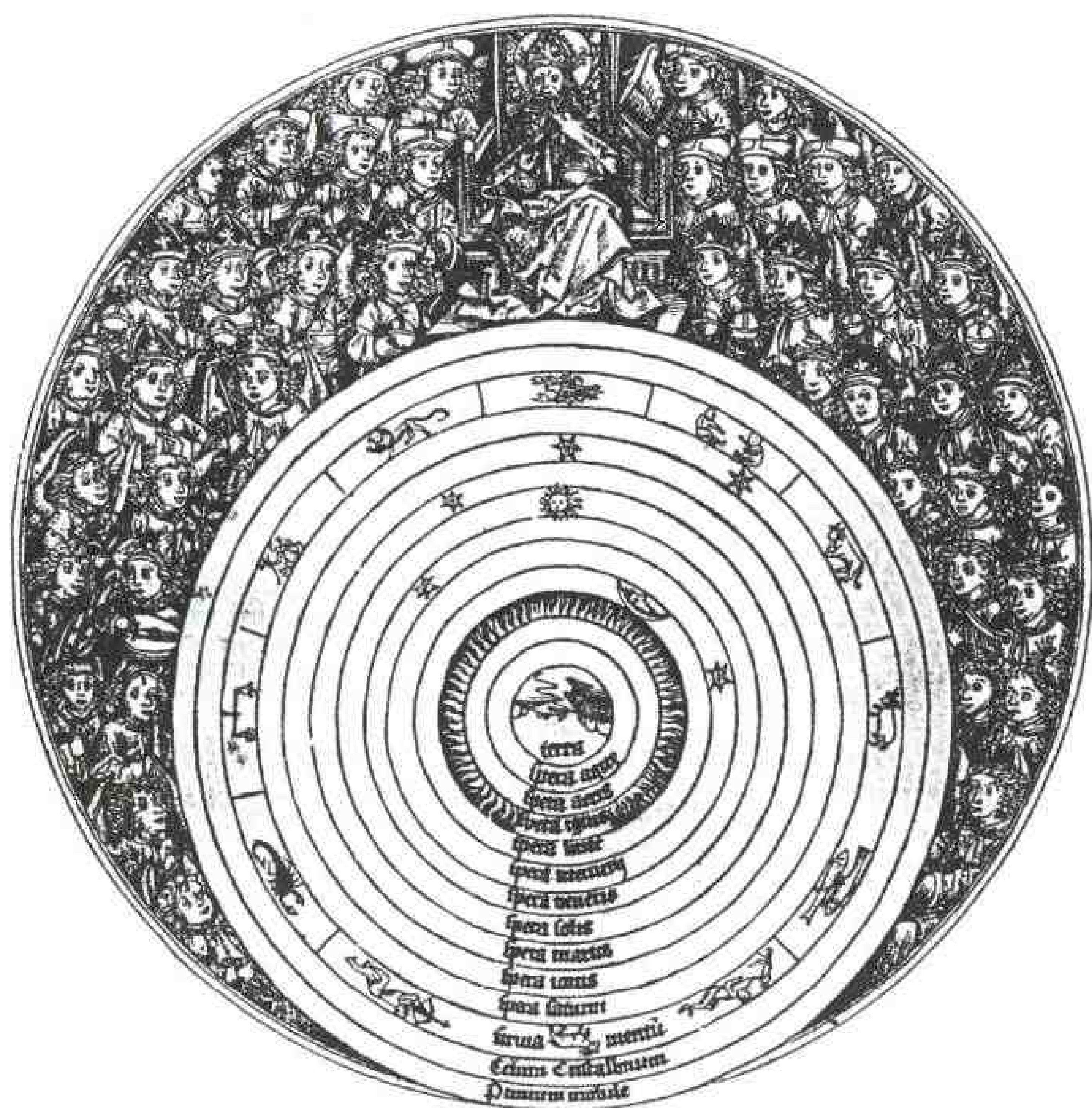
刚立足的大学时，它们带来的冲击对我们今天来说是难以理解的。一个文科学院的教师第一次得到的《至大论》一定代表了一个新的水准，但《至大论》所代表的这个新的水准与这个教师原有的技术鉴赏力是难以适应的，因为《至大论》的水准超出了他先前接触过的任何一本天文学著作好几个量级。

巴黎大学很快就使自己成为基督教世界的伟大文化中心。在所有的受过教育的人都能写和说拉丁语的时期，几乎没有什么障碍（除了财政上的）能阻止最好的教师和学生被吸引到一个公认的文化中心去，巴黎在公元13世纪吸引了相当大的一批天才人物。在巴黎和在其他地方一样，学院的任务仅仅是提供给学生基本的他们大多数都能用得到的教育。学院的教学最初是围绕着文科三艺——语法、修辞、逻辑和数学四艺——算术、音乐、几何、天文学构成的。学院的学生绝大

部分都很年轻——远比今天通常的大学生年轻，而教师们则已意识到更高一级学科（医学、法律，特别是神学）的声望。那些更有雄心的学生，可在获得硕士学位之后继续深造。他们很高兴看到大多数正在翻译的非医学著作明确属于文科学院。特别是，看到亚里士多德的作品和作为神学院主题的希伯来——基督教新发现——没什么关系。新的著作为学生们在与神学家之间进行的旨在提高自己地位的斗争中提供了一种武器。

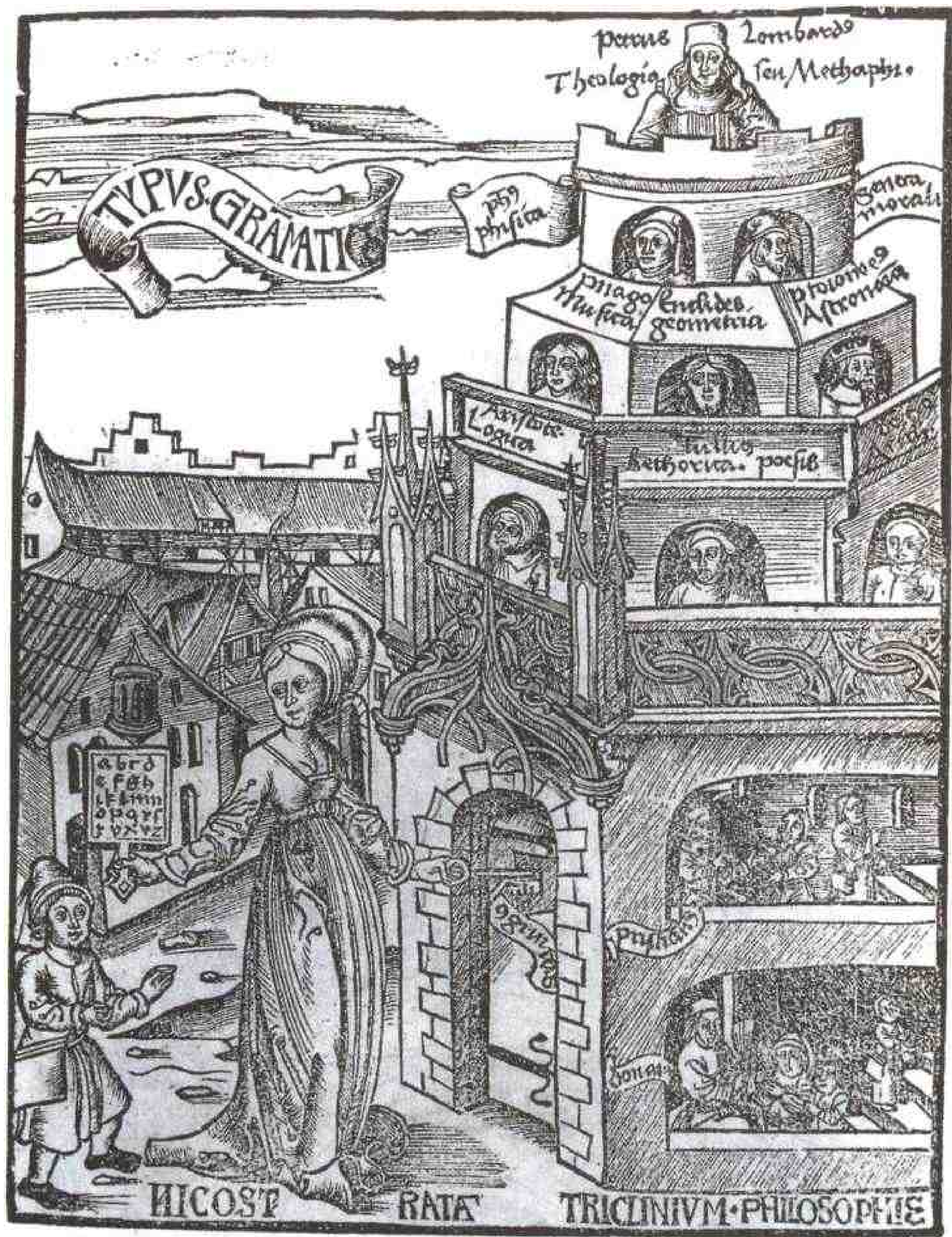
这样的政治气氛，为将异教徒亚里士多德的宇宙图象吸收到基督教神学已经统治了一千年的文化中的努力，增加了不可避免的困难。结果，巴黎的大学在公元13世纪的大部分时间里一片混乱。综合的最终完成，归功于意大利多明我会的修士托马斯·阿奎那（Thomas Aquinas，公元1225–1274年），他大力宣扬一种强有力的宇宙论，在这种宇宙论中，亚里士多德关于自然界的教导——其中有许多无论如何与通常的感觉不相符合——看起来它已经有了神圣天启的光环。

大多数亚里士多德的作品合并成了最后几年的文科课程，而文科课程又分成三种哲学：形而上学、道德哲学和自然哲学。这就意味着，只有很少的时间可以用于四艺了——以前一种非常基础的天文学一直是放在其中教授的，但是这种损失通过教授自然哲学课程是可以弥补的，因为亚里士多德自然哲学中含有许多与



左图为公元1493年出版的世界历史《纽伦堡编年史》(Nuremberg Chronicle) 中表现的基督教化了的宇宙。中心是四元素区，环绕中心的是七个行星球，这之外是苍穹，即水晶天球。亚里士多德很早以前就主张有第一推动者。在最外面我们看到的是上帝正在加冕，旁边有九个等级的天使。

一块公元1504年的木刻。描述了当时吸收消化了从希腊语翻译过来的著作之后的学术研究组织。在下面、罗马的作者大杜那图斯（Donatus）、普莱斯肯（Priscan）和西塞罗代表语法和修辞，博埃修斯代表算术，亚里士多德代表逻辑，毕达哥拉斯代表音乐，欧几里德代表几何学，托勒密代表天文学。上面是三种哲学：道德哲学（塞涅卡、Seneca）、自然哲学（无名，也许是亚里士多德，因为已经在下面出现过了）、以彼得·伦巴德为代表的形而上学或神学在最高处，他的《箴言》（Sentences）是神学的基本篇章。[①]



天文学相关的材料。虽然《至大论》和数理天文学中主要的阿拉伯著作一样，学文科的年轻学生中没有人尝试去掌握它们；手稿，即使是能得到的，也是很稀有的，不但相当昂贵而且常常有错误，但是无论如何，学生们学习最基本的天文学理论的条件比起学习其他知识的条件还是要好些。

进一步的研究——知识边界的扩展——不是大学的功能，大学的责任仅仅是

① 此书的正式名称是《箴言四书》（拉丁文书名：Libri quattuor sententiarum），最初出版于公元1157–1158年，是中世纪被用作经院哲学教科书中最著名的一种，因长期作为大学和修道院中学习神学的主要教材，所以它在本图中得到了如此地位。——译者注

教与育人。这贯穿于系统地学习被认可的优秀文献的过程中，贯穿于逻辑推理技巧的集中训练中。典型的中世纪学文科的学生不是数理天文学家，并且他们在学习天文学的过程中也没地方进行观测，但是另一方面，一旦告诉他们本轮或“对点”，他们很可能会对其真实性和确定性形成非常肯定的观点。

翻译过来的天文学作品的质量很快就使得引文不再那么令人接受了。第一个弥补这个裂缝的是霍利伍德的约翰（John of Holywood）——他的拉丁名字是萨克罗玻斯克（Sacrobosco）更为人们熟知。他在公元13世纪中期任教于巴黎。为了满足学习天文学的需要，他给学生提供了三部短小的作品：一是关于时间计算的概论（Compotus）；二是满足天文学计算之需算术（Algorismus）；三是《天球》（Tractatus de sphaera）。



星占学家(左)提请萨克罗玻斯克注意托勒密(右)——他正在用星盘进行观测。

萨克罗玻斯克的《天球》包括四篇：第一篇研究天球、天球的旋转、地球的球形和它的中心位置；第二篇定义了天体的赤道、黄道、黄道带、黄道带上的星座、子午线、天极的地平高度，以及地球上回归线和极圈的划分。第三篇研究了天体的升和落、白昼和夜晚在不同纬度和季节条件下的长度；第四篇给出了太阳、月亮和行星运动的简短描述，给出了交食理论的纲要。

前三篇达到了一个可容忍的标准，但也仅仅如此而已；第四篇就完全不够格了，教师需要某种更好的东西。为弥补这个缺陷而写成的最流行的文本，是公元13世纪下半叶匿名的《行星理论》（Theory of the Planets）。该书从希帕恰斯的太阳运动理论开始一直讲到托勒密的月亮和外行星运动理论。作者在金星、水星和行星的正向及逆行运动上用了好几章。他通过明确陈述的定义，简单然而很好地描述了几何模型。但是，他不太满意他处理的其他主题，比如说交食。

其他的作者打算及时地写出一些论文来修正《行星理论》的缺点，正如《行星理论》修正了《天球》中的缺点一样。通过研究保存下来的手稿作品，形成了一个学生所需要的一系列论述——这些论述的质量随着那些不能令人满意的作品的退出和被更好的作品所替代而得到持续的改进，研究中世纪天文学的历

史学家能够由此检测到天文学教学质量的不断提高。

我们发现的其他的作品是叙述历法的。关于行星运动的《阿尔方索星表》，是以公元13世纪天文学的赞助人卡斯提尔的国王阿尔方索十世（King Alfonso X）命名的（尽管现代有些历史学家认为该表实际起源于法国）。这些表很快就取代了从阿拉伯人那里继承下来的《托莱多天文表》。现代计算机分析表明，这些表是根据托勒密的行星运动模型计算的，只是偶尔有参数的调整。

当时手稿收集的另一个引人注意的特点是对仪器的新兴趣。老的“四分仪”

天球和它的运动精灵

将亚里士多德极有吸引力的天球合并到基督教的宇宙图景中，产生了一个以既神圣又世俗的知识为基础的宇宙学。但是在七个行星之外还是有不少问题。恒星球体的复合运动是如何得出的？这个球体和根据《创世纪》的故事在第一天创造的“上天”之间是什么关系？和在第二天产生并在第四天出现的“天空”是什么关系？还有“天上之水”是什么做成的？

每个人都同意这样的观点，恒星除了它们的日常运动外，还随地球旋转轴的摆动而慢慢移动（“岁差”）。很多天文学家都错误地认为，岁差运动的速度是变化着的，它包括第三种运动即所谓的“颤动”。为了生成这三种运动，作者一般假定三个球是有必要的。典型的例子如萨克森的阿尔伯特（Albert of Saxony，约公元1316–1390年），他是个领导人物，先是在巴黎，然后是在维也纳大学担任教职。他将岁差指派给了第八个天球，将“颤动”指派给了第九个，周日运动则指派给了第十个。

但是这些天球是如何和《创世纪》里讲的天国相连的呢？天空常常以第八个球来区分，天空中有恒星。“天上之水”常常被认为和水晶一样透明和坚硬，结构和第九个球一样（或第十个）。第一天创造出来的“上天”处于所有天球的最外面（常常是第十一）。永静不动的第十一天球纯粹是为神学服务的。第十一天球是宇宙的最终容器，是上帝和灵魂得救者的住所。

亚里士多德的自然哲学要求所有的运动都有一个原因。是什么使得行星和恒星天球运动呢？所有的天体都是由一种元素——第五元素或“精华”构成的，因此，实质上它们的运动是无摩擦的，因而也是非实质性的，但是它们总要有某种运动的理由。终极来源在于上帝，它是最初的推动者，它直接使得最外面的天球运动。但是上帝也指派了其他每个运动天球的非物质性、精神智力或角度，这使这些天球得以自动进行永不停止的适当的匀速圆周运动。

为了寻求关于天球持续运动的更令人满意的解释，公元14世纪巴黎的让·布里丹（Jean Buridan）引进了“冲

一位神学家和一位天文学家在讨论天球。除了基本完备的八个天球（七个行星天球和一个恒星天球）外，天文学家还需要增加一个天球来说明岁差——如果他们相信岁差速率是变动的话就需要两个，而神学家则需要更多的天球来适应《创世纪》中对天的描述。



力”的概念，这个概念本来是为解释飞弹持续运动的原因而创造出来的。他指出，《圣经》中没有提及天使的智慧（意即天使们不会去推动天球——译者注），而如果上帝在创世的时刻将推动力加到每个天球上，天球则在没有摩擦的情况下，足以无限期地运动下去。

上帝正在推动最外层的天球。乔万尼·狄·保罗（Giovanni di Paolo）的《逐出伊甸园》（Expulsion from the Garden of Eden）。此画约作于公元1445年，是为锡耶纳的圣多明我会教堂之威尔夫小礼拜堂而作。



天使们正在使天球旋转



“古老”的四分仪（黄铜所制的四分之一圆）在公元13世纪上半叶为欧洲所知。它可以用来测量地平高度：观察者沿着仪器的边向目标看时，目标的地平高度就会显示在盘面周围和铅锤交会处。然而仪器的精巧之处在其刻度，有弯曲的时间线和可调整的盘面，它可以在任何纬度上当作日晷来用。

（见本页图）在阿尔方索的天文学家编纂的百科全书中有所描述，但是到了公元13世纪末，它被改进为蒙彼利埃的天文学家“犹太人”普罗法提乌斯（Profatius the Jew，也就是Jacob ben Mahir，约公元1236-1304年）的更为复杂的“新四分仪”（四分仪和星盘的混合体）。另一个犹太天文学家、普罗旺斯的戈森（Levi ben Gerson，1288—1344年）发明了十字仪，它可以被用来直接测量两个天体（比如恒星）之间的角度。

在拉丁西方，为特定目的而建立的天文台从未听说过，直到公元16世纪晚期的第谷·布拉赫（Tycho Brahe）的时代到来之前一直是如此。所有的观察都是在私人住宅应用便携式仪器进行的。例如，公元1274年丹麦卢斯克力德地方的一位天文学家利用一具星盘测量了一年中每一天正午时的太阳的地平高度，利用获得的这些资料可以计算出白昼的长度。

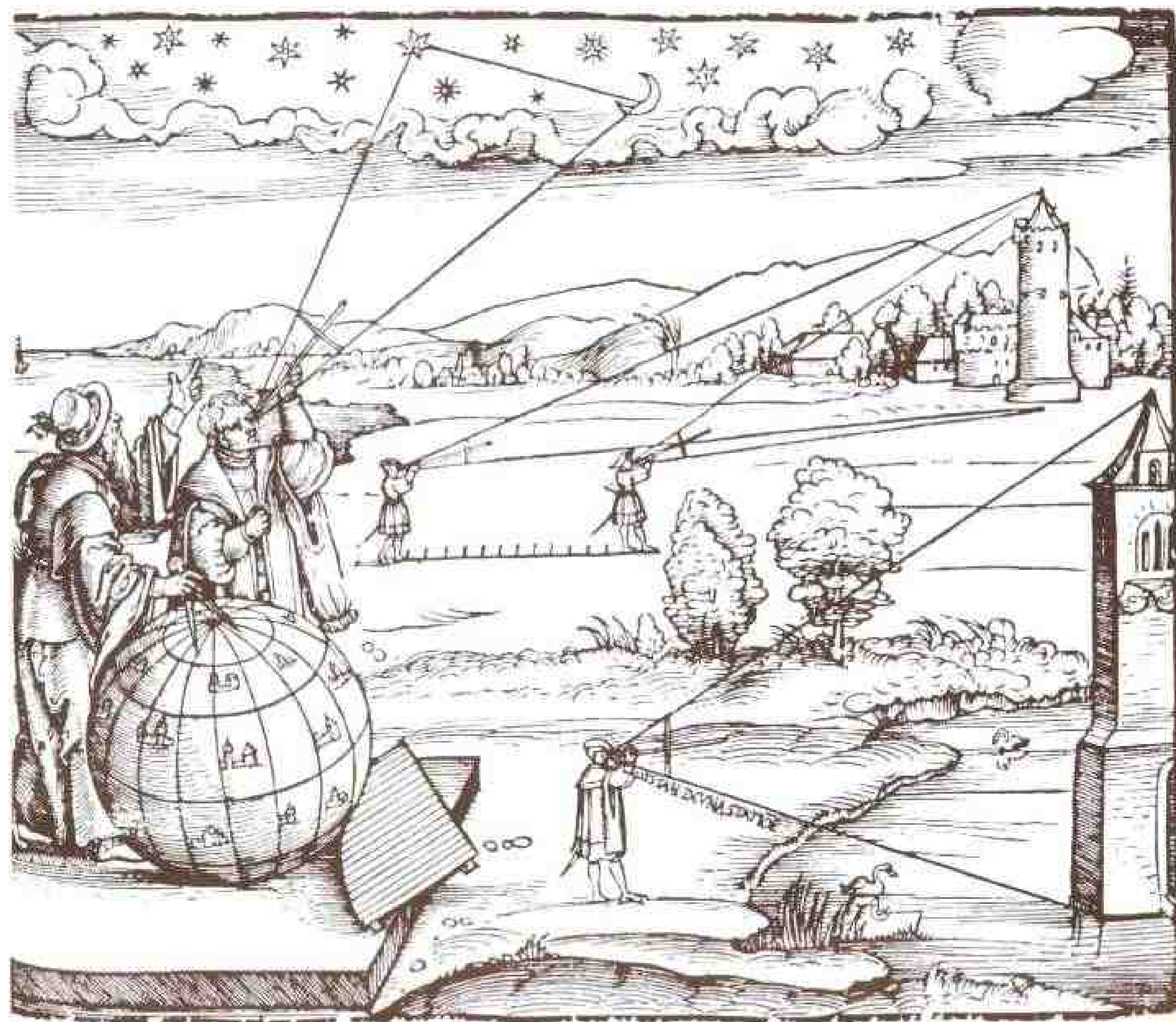
对托勒密的评论，来自于关心宇宙真实情况的自然哲学家而不是数理天文学家——对于他们的计算来说，托勒密模型（只是极偶然地更新参数）必不可少。大

多数拉丁哲学家同意阿拉伯同行们的观点，"对点"所暗示的非匀速运动在现实世界是不可能发生的。事实上，对于许多人来说，本轮和偏心圆也同样是不可接受的：实际上发生的一定是匀速圆周运动，只是它们没有围绕着地球这个居于宇宙中心由粗陋物质聚合而成的球状物发生而已。

但是，地球绕轴旋转将会发生什么可能的事情呢？这样的运动对于居住在陆地上的人类来讲当然是难以置信的，但是相反的问题来自于对运动着的物体的考虑，比如说射箭——而不是来自天文学，更不是来自相关的轨迹图（中世纪的人比起后宗教改革时期的人能够采取更多的测量方法）。正如亚里士多德所教导的，将箭垂直射向天空，箭还会落在刚才射手所在的位置，由此证明我们脚下的大地在箭飞行的时候并没有运动。

可是，亚里士多德关于飞驰物的理论自身是混乱的，因为他的关于箭为什么离开弓弦还能继续上升的解释明显是荒谬的。在继续上升的过程中，尽管箭也是由地球元素构成的，但还是进一步远离了它的位于地球中心的自然位置；这种反自然（或"粗暴的"）的运动必定是外力作用的结果。亚里士多德急于找到外力的来源，但他只找到了一种可能的候选者即周围的空气，因为这是惟一能接触到箭的物质。不知什么原因，由于空气被设计成为一段时间内推动箭向上运动的动力，所以它在箭离弦的那一刻就开始阻止箭落回地面。

公元14世纪中期巴黎的大师们并不是最早的指出其中荒谬性的人——因为如果亚里士多德是对的，箭怎么能够不顾大风而射出去呢？——但是他们是详细说



在这幅公元1533年的木刻中，一个航海者正在学习如何使用十字仪来测量月亮和一个特定恒星之间的角度，其余的是测量员正利用这一仪器来测定塔的高度。为了使用十字仪测出两个分立物体之间的角度，观察者需要滑动垂直的木条，使两个物体分别从木条的两端看去都成一直线。两个物体的角度可以从中间的数字刻度上读出来。这种仪器的一个新型号后来被海员们广泛应用，尽管它由于在使用时必须忍受移动垂直木条的不便。观察者将两个物体排列成线的感觉是，先将一个物体排列成线，然后再排另一个是不可行的。



圣奥尔本修道院院长、沃林福德的理查德（Richard of Wallingford）及其为修道院设计的钟在一起。理查德患麻风病，故被画成麻脸。

时钟介绍

关于机械钟的确切记录从公元14世纪才开始。它并不是从简单和原始开始的，而是一出现就有高度复杂的综合机构，历史学家对此事实兴趣盎然却又迷惑不解。毫不奇怪——因为授时是来源于天文学的——更成熟的钟是天文钟。其中有些是机械星盘，而另一些是天文学演示仪器的机械化。历史学家在探索早期的简单机械时

遇到了很大的阻力，因为拉丁文中的单词“钟表”(horologium)既指时钟也指日晷。

沃林福德的理查德（约公元1292－1336年），圣奥尔本修道院院长，在公元14世纪早期建造了一座著名的天文时钟，并且留下了详细的技术说明。这座钟是中世纪宇宙的复制品。它的特点包括能给出月相和月食（用不同的齿轮），一个椭圆形的轮子能给出月亮绕一个星盘的刻度盘运行时的精确速率。

那个时期更加著名的是帕多瓦的天文学教授东迪(Giovanni de' Dondi，公元1318—1389年)的“天文钟”。这架机器公元1364年完成于帕维亚，也给出了完整的说明文件，现已被复制出来。它有一个七边形的结构和一个刻度盘，对应着每一个行星（太阳、月亮、水星等等），每个装置反映一个托勒密的行星轨迹图形。下面是用来显示昼夜24小时、日出日落时间等等的刻度盘。“天文钟”是那个时代的奇迹之一，雷纪奥蒙塔努斯(Regiomontanus，参见本书第82—83页)在公元1463年参观过它，并记录了当时高级教士和王子们将它视为一项奇迹而蜂拥前往参观的盛况。

大型的置于公共场所的天文钟于公元15世纪和16世纪普及起来，如安装在斯特拉斯堡（参见本书第128页）、帕多瓦、布拉格和许多其他城市中心以及教会引为自豪之场所的，都是著名的例子。

在这份公元15世纪德国人海因里希·苏索(Heinrich Suso，公元1300－1366年)的关于神秘主义实践的手稿《博学钟表》(Horloge de Sapience)中，女神莎碧安提娅（智慧）正在一间布满时间装置的房间里给该书作者上课。作者身后是一个有一根指针和24小时刻度（I—XII重复）的机械钟。钟的前面挂着一个星盘。莎碧安提娅的右边是一个精确性不清楚的铃声装置。桌子上是地平日晷、水钟和赤道式环球日晷（日晷被加上“环球”二字，是因为它能适用于地球上的任何地理纬度，“赤道式”是因为用它来测量昼夜24小时是相等的，而不是将白天和晚上各分成不同的12“小时”①）。挂在桌子上的是旧式的四分仪（参见本书第74页）。

① 赤道式日晷的刻度盘被置于赤道平面，这个平面与当地水平面之间是有夹角的——取决于当地的地理纬度，在赤道上与当地地平垂直，而在北极上与当地地平重合。如果将日晷刻度盘的倾角做成可调节的，它就成了所谓的“环球日晷”，因为每到不同的地理纬度，这个倾角可以调节。由于赤道式日晷的刻度比较简单，在上面可以直接读出等分间隔的24小时，而地平日晷则是将刻度盘置于当地水平面之内，其刻度就大为复杂。而且地平日晷通常都是针对当地地理纬度而建造的，故它不可能是所谓“全球”的。——译者注

纬度和航船在夜晚的时间

一个公元1616年制成的水手使用的星盘。为了减少风力的干扰，其结构被简化成了骨架的样子，为了加强稳定性，星盘的底部被增加了重量。



随着中世纪的逐渐结束，欧洲的航海者开始经常到视野所及的大陆之外的地方去探险。位置上的错误很容易造成海难。因此航海者们常常坚持一个原则：他们沿着能将他们带到所需要的纬度的路线航行，而这个纬度又可以使他们到达目的地的西方(或东方)。纬度的确定要靠观察。然后他们沿着纬度的平行线向东（或向西）航行。

纬度的测量很重要。白天，纬度可以靠太阳在中午的地平高度(也就是一天中太阳在天空中最高的时刻）来确定。为了测量，航海者们就要用到十字仪或水手星盘之类的仪器，然后参考一种表，这个表中在天球赤道的上方(或下方)有一年中太阳所处的位置。结合中午的观测和表中给出的角度，航海者们可以得出在船上看到的天球赤道的地平高度，并据此可以求得船的纬度。

如果精确地确定了极星在天极上的位置，航海者在晚上就可以简单地根据在船上测得的恒星地平高度得知航船所在的纬度了。但不幸的是，这是不行的——在公元1500年，极星和天极有3°的偏差——必须对此做出某些修正。

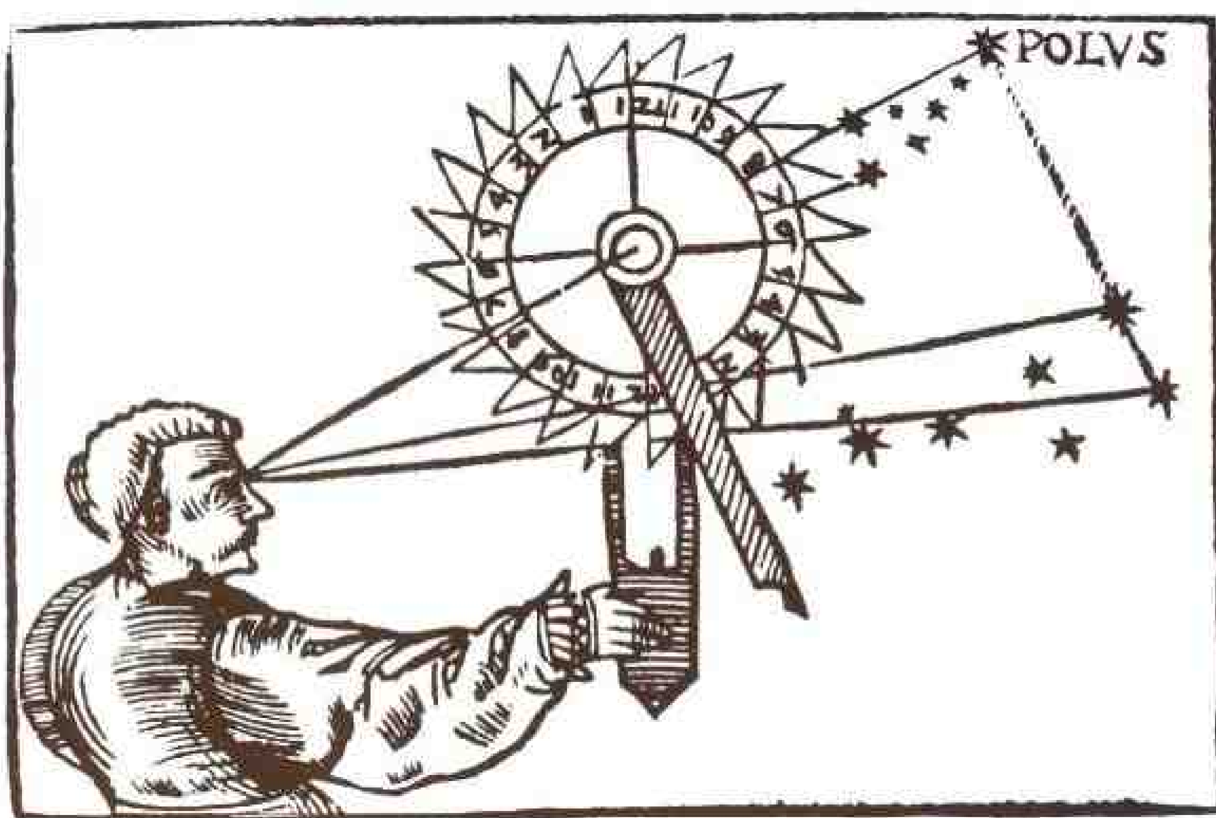
目前极星的位置可以从其他恒星绕天极旋转的形状中辨认出来。在实践中，航海者一般借助"守护者"，它是由两颗大熊星座的恒星（属北斗七星）碰巧和极星构成的一条直线，这条直线在天空中像24小时时钟的指针。但这里有一个复杂情况：时钟按照恒星时运转，而不是太阳时，我们看到太阳和恒星每天运转，但是因为太阳在以恒星为背景的天空中每年也转一圈，恒星日比太阳日少约4分钟，而这个差全年都在累计。一个精巧的仪器"夜间定时仪"，使得航海者既可计算出所需要的关于地平高度的调整，也可简单地得出晚上的（常规的）时间。它由两个同心圆构成，外边的接一个把手，刻有年历；里面的一个可以自由转动，刻有24小时。

明这种理论并将其应用到地球可能的旋转上去的人。让·布里丹（Jean Buridan，约1295—1358年）和尼古拉·奥莱斯姆（Nicole Oresme，约1320—1382年）都同意亚里士多德关于必有外力作用的观点，但是也都看到了将空气作为这种力的来源的荒谬性。他们都认为不是发射者——这种情况下是射手和他的弓——而是其他的东西给予了飞驰物一种"无形的运动力量"，这种其他的东西被他们称为"冲力"。

布里丹用这个概念解释了其它一些令人迷惑的现象，譬如自由落体的加速度

航海者转动里面的圆，使中午的标志和外面圆上的日期在一条线上；但这时要注意恒星时和太阳时的区别。接着举起这仪器，使其大致和天球赤道在一个平面上。然后透过中间的小孔看极星，并且抓住可以转动的延伸到圆圈之外的标志尺旋转，直到这个标志尺触到上述两颗恒星。这时标志尺外圈相交之处就是当时的时间。

为了弄清针对极星地平高度所需的修正，以便获得天极的真正地平高度从而求得航船的纬度，航海者只需参考仪器反面的刻度即可。另外借助如“北方星群”之类的表，也可以针对估计“守护者”所在方位而得的结果进行必要的修正。



夜间定时仪被用来确定夜晚的时间（这个例子中是在上午1：30进行的）。这个夜间定时仪在边上有“齿”，这样航海者在晚上如果仅仅是想知道大约是什么时间，只需用手摸就可以了。



18世纪初期制造的一个夜间定时仪。这个仪器是为使用小熊星座或大熊星座的恒星定时而设计的。



La figure et la disposicion du monde le nombre et ordre des elemens et les mouvemens des corps du ciel appartienent a savoir a tout homme qui est de franche condicion et de noble engin. C'est bele chose et delectable profitable et honeste et avecques ce est necessaire pour savoir plus et especial d'astrologie. Ci vez afin que engin humain peust plus legierement tele chose comprendre les sages anciens composerent entre les autres un instrument qui est appelle espere material ou artificiel le quel on peut regarder tout en tour in manier et tourner et y considerer en partie la descripcion et le mouvement du monde et du ciel ainsi

问题，他说是冲力使得物体持续下落，而自然下落的趋势产生了加速度。同时奥莱斯姆指出，如果地球是旋转的，那么射手会移动到一侧去的。因此，要想抓住先前射出的箭的话，那么射手和箭将一起向一侧运动，因而将给予箭一个侧冲力。这个冲力将使得箭在飞行的时候和下面射手保持一致，一起向一侧运动，因而落在射手的旁边。也就是说，不管地球是不是动的，垂直射出的箭将落在射手身上，因此，一个人不能简单地通过向空中射箭来确定地球是否是静止的。也不能——奥莱斯姆说——通过自然哲学的其他问题来确定，比如通过天文观察或是通过研究《圣经》的引文来确定。他自己相信地球是静止的，但给不出证明。

奥莱斯姆的讨论，仅仅是一个公元14世纪学术大师们自信心增长和准备向亚里士多德发难的例子。公元12世纪知识界有了被译成拉丁文的天文学作品，13世纪人们又对其进行了消化吸收，现在将要向前发展了。在未来的世纪里，一种新的技术将出现，并且将革新对数理科学，特别是几何学和天文学的研究——这就是印刷术的发明。

印刷术和人文主义的兴起

书籍是将知识从一代人传递到下一代人的最有效的媒介。在印刷术产生之前，书籍是以手稿的形式出现的，它的复制——即从一部到另一部，很费人力——主要靠抄写员完成。如果主题是用文字表示的——比如文本是亚里士多德的作品，抄写员将对他要复制的内容有所了解；甚至可能要对已发现的前人的小错误进行改正。可是如果主题是以符号表示的，就像关于几何和天文的论述一样，这时抄写员将很少发现前人的错误。因此，这些早期天文学上的错误一再被重复下去，并且在抄写新的副本的时候，抄写员将还会带入一些他自己的错误。这样做的结果是，一个未来的天文学家想掌握《至大论》——即使设法得到了它的副本——也将发现他不得不为了解不可信的文本的意义而斗争。

15世纪中期印刷术和铅活字的发明改变了局面。它使得古代著作的学术编辑，值得将几个月甚至几年的时间用于编辑文本，使之可信地反映原作者的意图；因为他可以改正印刷者的校样，指导木版插图的制作，直至各方面都令人满意，然后成百上千的统一的副本被印制出来，并被分发到欧洲各地以合理的价钱出售。

这种发展的意义，没有比给天文学带来的更大的了。而且，印刷术的发明正巧是在对希腊和罗马的成就评价不断增长的时期。古代逐渐被看成是艺术、文学和哲学成就——那是从衰落的中世纪延续下来的——的黄金年代。这种"人文主义"运动最初的著作，只是关于人的而不是关于自然的，但是所有古代的作品，即使是科学方面的，都是值得珍藏的遗产。

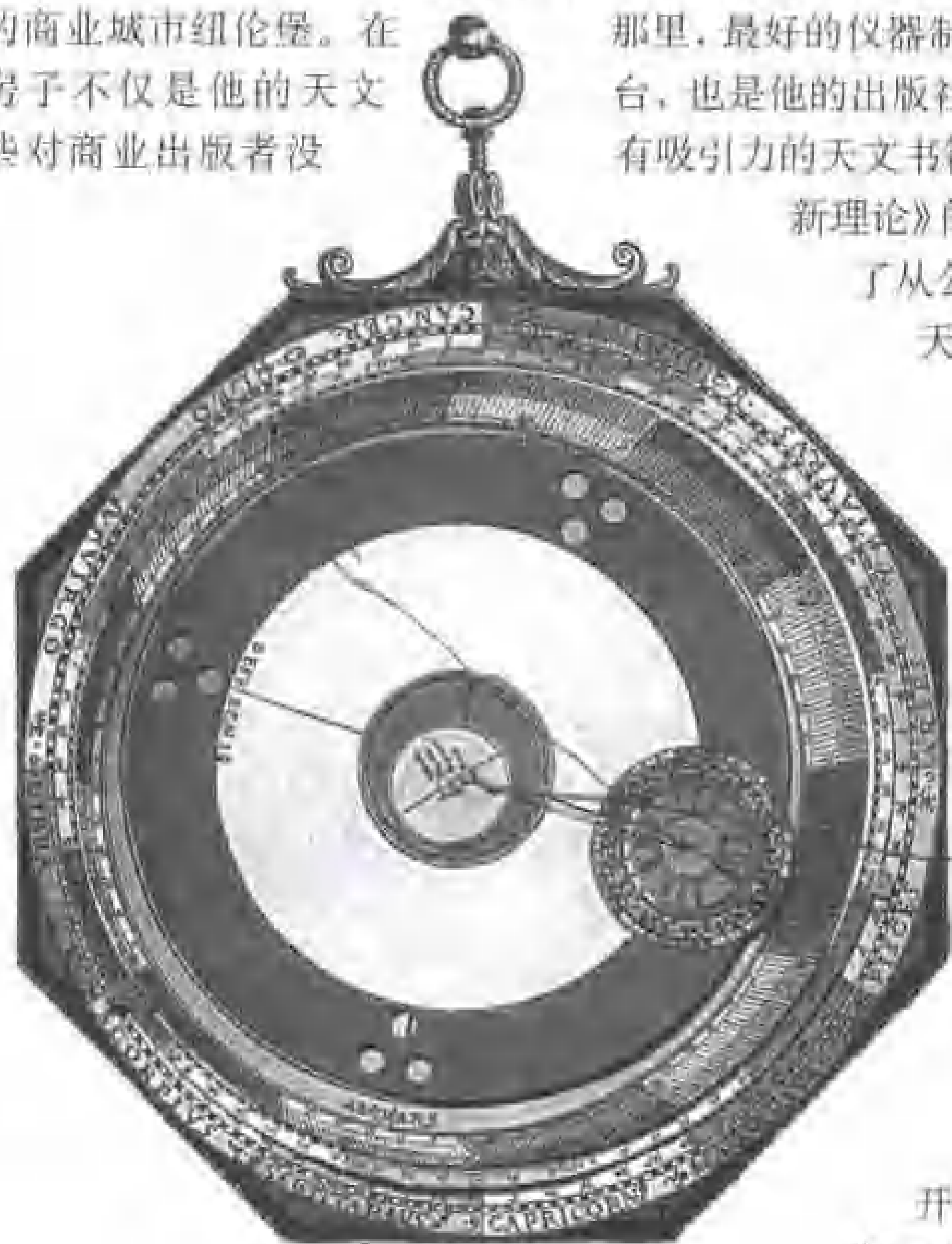
一个人文主义运动的领袖人物是希腊学者贝萨瑞恩(Johannes Bessarion，约公元1395—1472年)，他在君士坦丁堡接受的教育。他来到意大利参加了希腊和罗马教会的重新合并；当这一合并被证明不成功时，他留在了西方并在公元1439年成了红衣主教。公元1460年，贝萨瑞恩作为罗马教皇的使节来到维也纳，会见了奥地利宫廷星占学家乔治·普尔巴赫（Georg Peurbach，公元1423—1461年）和

左页图：一幅显示尼古拉·奥莱斯姆（Nicole Oresme）正在书房工作的彩饰画，书房里还有一架浑仪。出自奥莱斯姆《巡天概要》（Traite de l'Espere，手稿曾为白瑞公爵所有）公元15世纪的抄本，该抄本与他对亚里士多德的《论天地》（On the Heavens and the Earth）评注有关。这是奥莱斯姆许多作品中的一部，是应国王查理五世（Charles V）的要求，用古法语来撰写或翻译，从而促成了一门新的使用法语的科学术语学。在对《论天地》的评注中，奥莱斯姆表明并无证据能够证明地球是静止不动的；在他的其它作品中，他还表明自己是星占学的坚决批判者。

他在天文学上的年轻合作者，柯尼斯堡的约翰尼斯·穆勒（Johannes Muller，1436－1476年），即以其出生地的拉丁化名字而闻名的雷纪奥蒙塔努斯（Regiomontanus）。普尔巴赫已经写完了《行星新理论》（Theoricae novae planetrum），并准备以此代替公元13世纪同名的教材。雷纪奥蒙塔努斯大约在公元1474年看到这本书付印，在普尔巴赫早逝之后若干年，这本书变成了畅销的教科书，到17世纪该书已有几十种版本出现。此书的特点之一，是它将托勒密的行星模型用实心球详细给出了“物理真实表示”（参见本书第41页），这些表示中的不足也许就是导致哥白尼从事行星天文学研究的动力。最后，第谷·布拉赫关于1577年大彗星确实没有障碍地穿过行星空间的证明（参见本书第93页），这证明实心球一说是错误的。

贝萨瑞恩自己是著名学者，也是手稿收藏者，他很想看到，通过系统的节略，《至大论》能够更容易被学生理解。这项工作吸引了另一位天文学家普尔巴赫参与其中；但是不到一年，普尔巴赫去世了，节略工作只进行了前六卷。临终前，他请求他的朋友雷纪奥蒙塔努斯完成这项工作，而最终雷纪奥蒙塔努斯和贝萨瑞恩在意大利也完成了这项节略工作。节略本《至大论纲要》（原书名：Epitoma Almagesti Ptolemaei——译者注），篇幅为原著的一半，是简洁的典范，于公元1496年付印，随着其副本在欧洲的广泛流传，托勒密的数理天文学终于变得容易理解了。甚至有一天《至大论》都会被此书替代。

公元1471年，和贝萨瑞恩住了一段时期之后，雷纪奥蒙塔努斯定居到了繁荣的商业城市纽伦堡。在那里，最好的仪器制造商与他比邻而居，他的房子不仅是他的天文台，也是他的出版社。在那里，他可以出版一些对商业出版者没有吸引力的天文书籍；紧随普尔巴赫的《行星新理论》的是《天文年历》——给出了从公元1475－1506年每天的天体位置，是此类书籍中最早被印刷的一本。哥伦布（Columbus）在第四次航行的时候（公元1502－1504年）带了一本雷纪奥蒙塔努斯的书，并根据该书对1504年2月29日月食的预测，威慑住了在牙买加与他敌对的土人。



印刷术的发明使得带有纸板模型（日月升落仪）的书籍得以复制，纸板模式过去是用来计算行星位置的。这些书中最华丽奢侈的是公元1540年因戈斯塔德的教授彼得·阿皮安（Peter Apian，公元1495－1552年）出版的《帝王天文学》（Astronomicum Caesareum）。书中模型的刻度盘显示了阿皮安的赞助人皇帝查理五世（Charls V，注意与上文所说国王查理五世并非同一人——译者注）的生日——1500年2月23日这天的水星黄经的模型。在刻度盘上，为了将相应的点连接起来，书中的该刻度盘在必要的地方使用了细线。

然而到公元1475年，雷纪奥蒙塔努斯离开纽伦堡到了罗马，他此行的目的显然是为了帮助那里的

1502	1502	1504
Finster der Sunnē	Finster des mōdes	Finster des mōdes
30 19 45	15 12 20	29 13 36
Des Herbstmōdes	Des Weinmōdes	Des Hornungs
Halbe werung	Halbe werung	Halbe werung
1 7	1 1	1 46
Czehen punct	Drei punct	

雷纪奥蒙塔努斯在公元1474年出版的、哥伦布在第四次航行时携带的《天文年历》中某页的一部分。右边是哥伦布用来威慑牙买加敌对土人的1504年2月29日月食的预测。由于相信是哥伦布的祈祷挽救了月亮，土人们给了哥伦布和他的船员们很多必要的食物

历法改革，但到那里之后他也过早地离开了人世。不过在纽伦堡时他找到了一位合作者——商人伯恩哈德·瓦特（Bernhard Walther，公元1430—1504年）。瓦特的观测从雷纪奥蒙塔努斯离开纽伦堡的第五天开始，前后一直持续了近三十年。他在天文测量的精确性方面达到了一个新水平，他的观测在哥白尼、第谷·布拉赫和开普勒那里得到了广泛应用。

哥白尼和希腊过程的顶点

尼古拉·哥白尼（Nicolaus Copernicus，公元1473-1543年）生于波兰的托伦，毕业于克拉科夫大学。尽管远离欧洲的文化中心，但克拉科夫大学有一个优秀的天文学传统，包括那些从不隐瞒他们对于“对点”扰乱匀速圆周运动的不满观点的教师们。

公元1496年，哥白尼到意大利学习。君士坦丁堡如今已不在基督教的控制之下，因为这座有着悠久希腊文化传统的城市在公元1453年落入了穆斯林手里。在此重大事变的前十几年里，希腊学者已经开始向西方特别是意大利移动。费奇诺于公元1462年仿照柏拉图的学园在佛罗伦萨建起了一所学校。希腊人现在在大学里广泛地进行研究，柏拉图的高雅的对话——在中世纪大多不被人知——现在可以看到并且对人们的思想逐渐带来深刻的影响。尽管托勒密的传统趋于抽象，远离了对自然的实际观察，但是它充满了看待自然的数学眼光和建立反映宇宙和谐与对称的宇宙理论的必要性。

在意大利，哥白尼研究教会法律和医学。但是他也学习希腊语并发展他在天文学方面的兴趣。据他后来的学生乔治·J. 赖蒂库斯（Georg Joachim Rheticus，

公元1514–1574年）告诉我们，大约1500年在罗马，哥白尼在成为专家之前就曾做过天文学的讲演。当时天文学的情形远不能令人满意。历法——社会对天文学家的基本需要——明显跟不上季节的步伐（直到1582年格利高里的改革——参见本书第100页）。对于所有学文科的学生来说，托勒密行星模型中“对点”的存在是耻辱的根源，以致赖蒂库斯将它描述成是“自然所憎恨之事”。那些深入研究数理天文学的人很迷惑，因为托勒密模型意味着月亮视直径变化非常之大（参见本书第39页），但事实显然不是这样。托勒密的《行星假说》连同其对行星系统的整体化解释，都已经佚失；在当时的柏拉图主义思潮中，《至大论》中托勒密单独处理每个行星而未试图发展连贯的宇宙理论的做法，使得这部著作不能令人满意。当时的天文学家哥白尼后来写道：

> 还没有能够发现或推断出所有的要点——宇宙的结构及其各部分的真正对称。但是它们就像从不同的地方拿来手、脚、头和其他肢体一样，即使描绘得很好，但不能恢复为原身，相互之间也不匹配——因此这些部件所产生的，与其说像人倒不如说更像怪物。

但是另一方面，计算行星表所用的几何模型被认为完全能满足要求：无论是模型的复杂程度，还是由此计算出来的表的精确程度，都是可以接受的。一个现代的神话说，到了16世纪，托勒密模型为了不顾一切地追求精度而被精心改造，为此目的它所需要的圆的数目多得离了谱。这个神话接着宣称，在以太阳为中心的假设下，圆的数量可以大大减少，因此地球的运动是为了这一简化而可以考虑接受的代价。

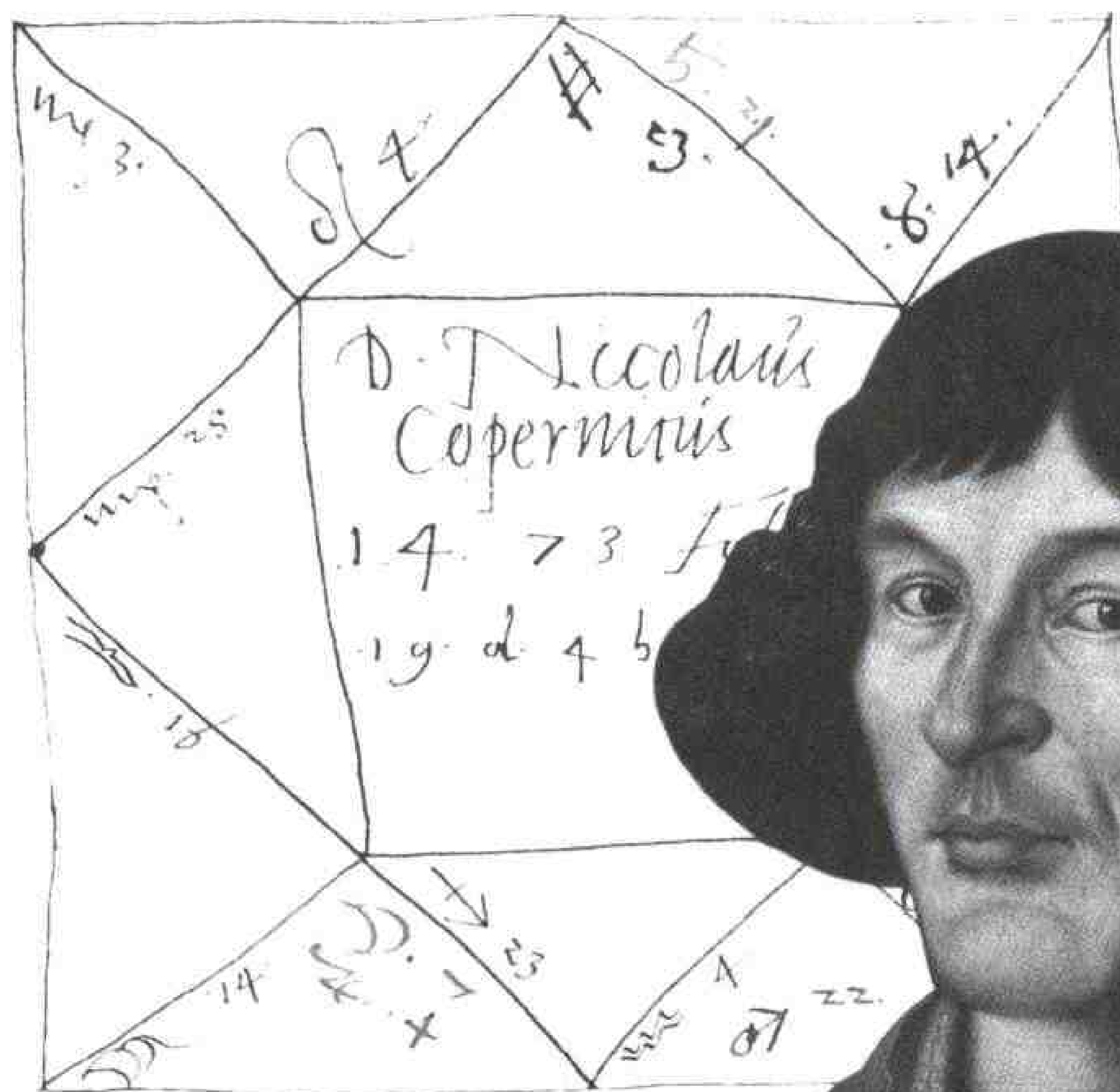
这个神话并不真实：哥白尼的详细模型在每一点上都和托勒密的模型同样复杂。事实上，这个神话显然不可能是真的；因为，只有新的观测才需要假想中的对托勒密模型的改造，而对于如此精度的观测仅仅依靠调整参数是不够的。但是如此精度的观测不仅从前未曾有过，而且不可能产生于这个时代——因为必需的仪器还不存在。不幸的是，这个神话却刚愎自用，这真是个羞耻，因为它事实上为科学史所知的最伟大的心智跃进之一提供了一个平庸的动机。

哥白尼

尼古拉·哥白尼公元1473年生于波兰的托伦，1491年进入克拉科夫大学学习教会法律，最后于公元1503年在费拉拉大学获得博士学位。在意大利时，他发展了自己对天文学的爱好，1479年3月他做了有记录的第一次观测，并在这个学科内获得了一些声誉。据说他在1500年曾在罗马给很多人做过天文学演讲。同时，通过他的一位当主教的舅舅的影响，他被选为弗洛姆布克（德国弗劳恩堡）大教堂教团的教士，这是一个无需任命的管理职位。1501年在教士大会的同意下，他又回意大利研究医学两年。1503年回到波兰，在弗洛姆布克教团服务，直到1543年去世。

对于那些因为其他理由要进行天文学改革的人（比如哥白尼）来说，有几条线索提供了改革的方向。有些也可以在亚里士多德自己的作品中找到。比如，在讨论地球静止时，亚里士多德按照他通常的习惯，在反驳前人的观点之前要先介绍这些观点，结果中世纪或文艺复兴时期大学的每个学生都知道了古希腊人是相信地球运动的。举一个真实的例子，萨克森的阿尔伯特（Albert of Saxon），他在公元13世纪50年代任巴黎大学校长，在他的《问题》（Questions）——关于亚里士多德《论大地》——中，详细解释了这些古代的观点，他得出的结论是："Ita dixerunt solem non movericirca terram sed magis terram circa solem——因此他们说太阳并不绕地球转动，而是地球绕太阳转动。"阿尔伯特赞同亚里士多德的结论并不奇怪，但是阿尔伯特的《问题》，连同他对这些古代观点的介绍，在哥白尼生活的时代却至少重印了六次。

左下线画图：一个哥白尼出生时的算命天宫图。中间正方形内是出生日期、小时和分钟。在正方形周围是十二个三角形，每一个都是黄道的一宫。一个人的命运，取决于哪些行星在哪些宫、哪些行星统治了哪些宫，要看一个行星是否与它所处的宫相适应，或者是否处在它能发挥最大（或最小）影响的位置，还要看诸行星的相互位置。



16世纪的一张哥白尼油画像，很可能是根据他的自画像画的。现在这张画像被挂在哥白尼出生地托伦的市政厅。


AD LECTOREM DE HYPOTHESIBVS HVIVS OPERIS.

NICOLAVS SCHONBERGIVS CARDINALIS Capuanus, Nicolao Copernico, S.

哥白尼《天体运行论》书影。其中未经作者同意也未署名的由奥西安德（Osiander）加上的前言，被早期的拥有者删除了，直到1609年开普勒在他的《新天文学》（Astronomia nova）中揭示了事实真相后，《天体运行论》作者的真实身份才广为人知。

另一线索来自于一个神秘现象：为什么太阳的周年周期在每个行星模型中能被发现。普尔巴赫曾写道："显然，六个行星中的每一个，在其运动中都与太阳共享着某些东西，太阳的运动因而可以说是共同的要素，是每个行星运动的度量。"现在我们知道其中的原因：相对于地球上的我们，太阳带着诸行星每年绕黄道旋转一周，故它们相对于我们运动的令人满意的表示——这正是托勒密所努力的——必然在每个模型中都包括太阳的周年周期。

公元1503年，哥白尼回到了祖国波兰，在那里成了弗洛姆布克（德国弗劳恩堡）大教堂的一名教士，他舅舅是那里的主教。他是一名教士（但不是牧师），又是一个管理人员和私人天文学家。我们对于他此后若干年思想的发展所知甚少，但是不久之后他的一份后来名字为《要释》(Commentariolus) 或《小评注》(Little Commentary) 的手稿开始流行起来。在书中，他简要阐述了他对现行行星天文学的不满，特别提到了"对点"的问题。于是，他给出了一个以太阳为中心的假定（其中地球变成了一颗行星，它又有月亮这颗卫星），表明这种方法是如何使一个清晰的顺序被指派到诸行星（现在有六个）上去，并继续发展了无"对点"的行星和月亮运动的模型。

从赖蒂库斯——后来成为维滕堡大学的数学教师——那里，我们才知道一点这位波兰教士的消息。1539年赖蒂库斯决定去拜访哥白尼，哥白尼同意赖蒂库斯发表一个关于他的著作的《简报》，随后几年又出现了该《简报》的简编本。此后没有什么争论发生，也许就是因此哥白尼才同意赖蒂库斯将他的作品《论天球之

旋转》(On the Revolutions of the Heavenly Spheres) 在纽伦堡完整地印刷出版。《天体运行论》(De revolutionibus)——这才是此书众所周知的名字——出版于1543年，正是作者去世的那一年。

赖蒂库斯的教师职责，使得他不能在印刷过程中亲自关照手稿的每一节。这个任务落到了路德教会教师安德里亚·奥西安德(Andreas Osiander，公元1498–1552年)的肩上。出于保护作者免遭物议的好心，奥西安德在著作前面加了一个没有署名的前言(这样使人觉得是哥白尼自己加的)，宣称作者并不认为地球是围绕太阳旋转的，这样做只是一个方便的假设，以使在此基础上建立更有效的行星运动的数学模型。

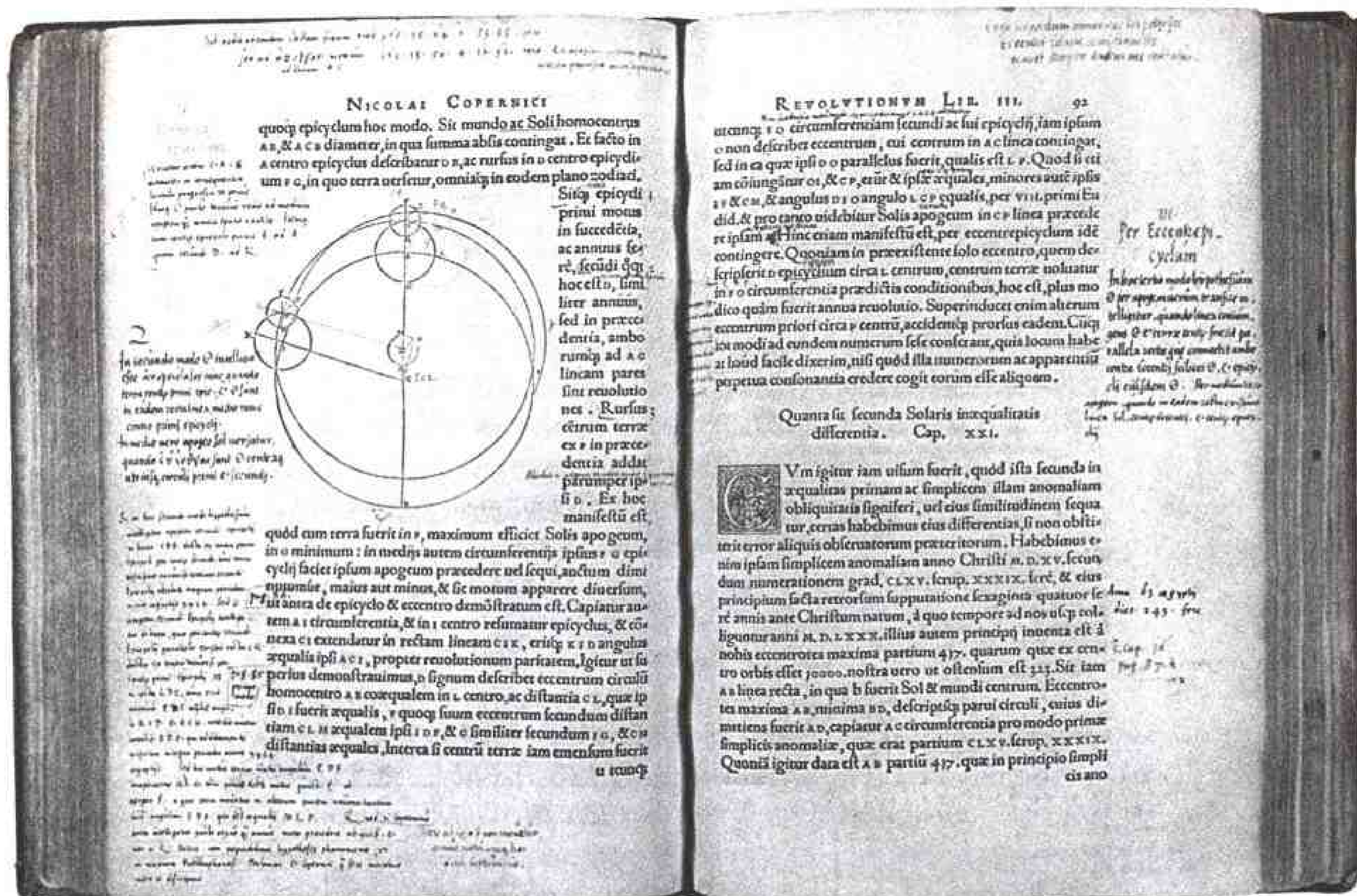
毫不奇怪，这足以混淆哥白尼的本意。作者的真实立场应该清楚地告诉每一位仔细研究整部著作的人。但是《天体运行论》的读者主要是计算行星位置表的技术天文学家，他们急于阅读这部著作是指望它能给他们的工作带来帮助。比如，1551年，维滕堡大学的天文学教授伊拉斯谟·莱因霍尔德(Erasmus Reinhold，1511–1553年)，以《天体运行论》为基础做出了《普鲁士星表》。他对哥白尼模型的参数做了一个很小的调整，对于模型本身他严格遵从，而对日心假说的真伪似乎没有兴趣。

哥白尼的论述试图同时满足两个十分不同的目的。在第一卷中，他陈述了地球是一颗绕太阳旋转的普通行星这样一个有吸引力的结论：诸行星将形成一个统一而综合的系统，而且许多令人迷惑的观察事实，将变得自然而然并可以预测。第一卷是关于宇宙的论述，尽管哥白尼能给出我们称之为的宇宙学的非强制性的证明，但第一卷主要关心的还是我们生活的这个宇宙的基本结构。而其余各卷，则是为了十分不同的目的而写的。它们通过给出若干可以从日心几何模型计算出来的行星表，提供了宇宙学的"工作理由"。这些卷关心的是数值，是推算与观测之间的密合，而不是真实与否的问题。

在第一卷中，哥白尼给出了视地球为绕日旋转行星的一个自然结果，即其它行星可以分成两组，一组的轨道在地球轨道以内，另一组的轨道在地球轨道以外。早在托勒密之前大家就知道，金星和水星只有在早上和黄昏的时候才可以被看到，而火星、木星和土星在晚上的任何时间都可以被看到。但是以托勒密的观点看来这一如此神秘的区分，如今在日心假说下则变成了一个自然而可预测的结果。

在托勒密天文学中，太阳绕地球旋转的周期是一年，因为金星和水星要陪伴太阳，所以它们的旋转周期必然也是一年。但是，如果哥白尼是正确的，并且在地球上的观察者的观察周期是一年，那么只要给他适当的时间，解开金星和水星的周期问题就很简单。它们的周期可以被证明分别是7.5个月和88天。这样每一个行星都有了它自己的周期。按照周期逐渐增大的顺序，这些行星最终可以排列成这样一个明确的序列：水星、金星、地球、火星、木星、土星。

但是，不仅是地球的周期被列入了我们对其余行星的观测之中，而且地球到太阳的距离("天文单位")也是如此。一旦这个距离被认可，这个公共的距离尺度就可以被应用到每一个行星的几何模型上去，于是计算每个行星到太阳的(相对的)距离将是简单的事情。这使哥白尼得出了第二个排列行星的标准：即按照



NICOLAI COPERNICI

REVOLVTIONVM LIB. III. 92

Quanta sit secunda Solaris inaequalitatis differentia. Cap. XXI.

伊拉斯谟·莱因霍尔德是哥白尼《天体运行论》的第一个优秀学生，对于哥白尼建议的各种取消托勒密“对点”的机制特别感兴趣。这里他的书边笔记列表区分了描述地球运动的圆。在本书中哥白尼说，他并不知道哪一个是正确的，“但其中一个必定是正确的，因为它们给出的结果一样。”

它们在日心系统中离太阳的距离来排列。

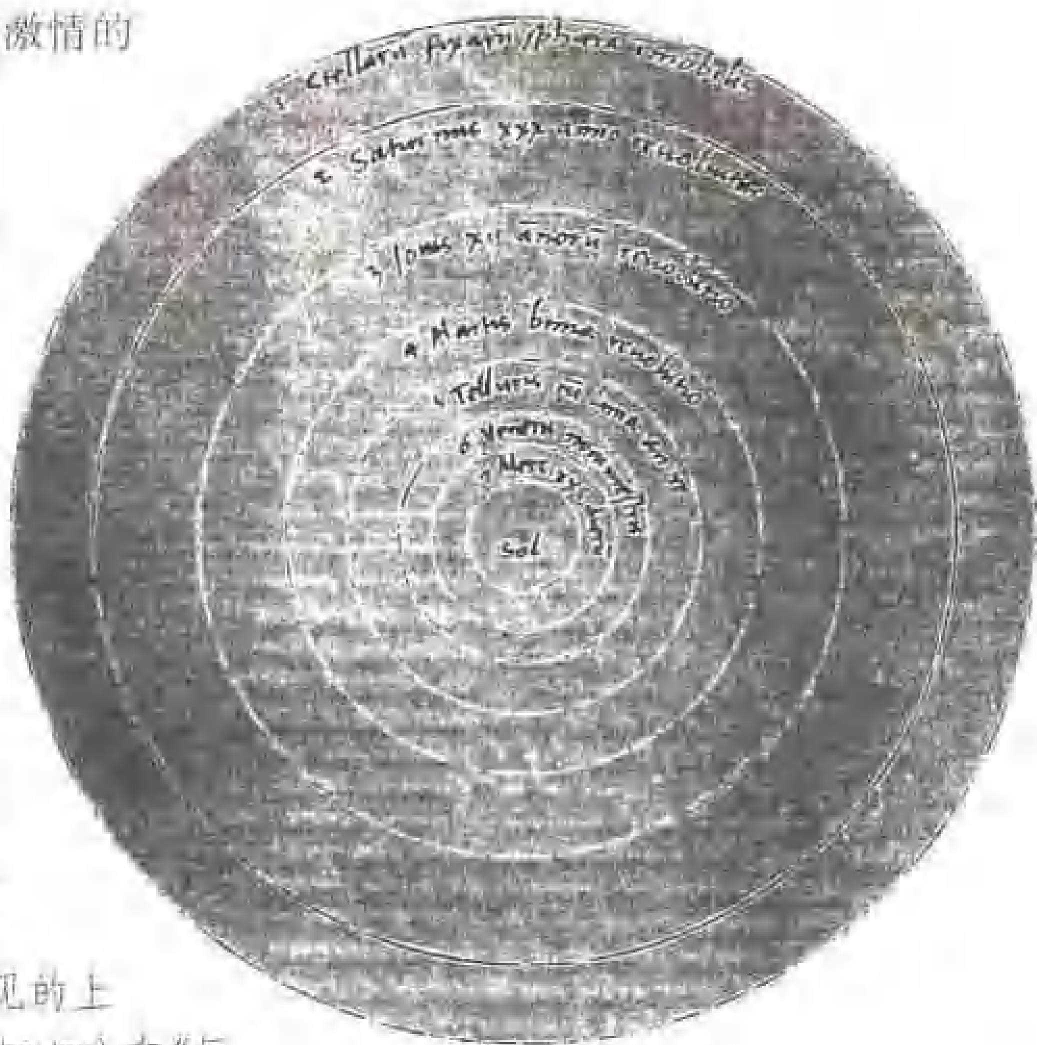
为了愉悦自己的柏拉图主义心灵，哥白尼发现这两个序列是统一的：“因此，在这种安排中，我们发现宇宙有一个极好的公度性，并且在运动的和谐性和轨道圆周的数量之间有一种确定的联系，而这是用任何其他的方式无法达到的。”

偶尔出现的、令人迷惑的行星逆行，为什么从柏拉图时代以来在数理天文学家的几何模型中表现起来是如此艰难呢？哥白尼认为它也可以根据日心观点来预测，因为这只是从一个运动平台上观察其他行星的自然结果。举例来说，我们地球的绕日旋转轨道是在火星轨道的内侧，大部分时间我们看到的火星和我们沿一个方向绕太阳旋转，但在相对较短的时间内我们实际上是追着火星运动的，因此火星在我们看来就是倒着运动的。逆行这一使行星获得“流浪者”之称的古老神秘的现象最终被给出了一个简单的解释。

如果一个人对于旋转轨道的大小和相关周期观察得稍微仔细一点的话，他一定容易计算出行星逆行的很多细节——比如一个行星从何处开始出现“留”（行星看上去在恒星背景上停滞不动——译者注），逆行多长时间，以及在何处它们恢复向前运动。哥白尼成功地列出了许多这样的观测事实，指出“所有的这些都出于同一原因，它们都取决于地球的运动。”

在表达太阳这个柏拉图传统中表示美好事物的符号现在成为宇宙中心的章节

中，哥白尼保留了最富激情的陈述：



哥白尼的太阳系图形，出自《天体运行论》第一卷手稿，图中有各个行星的（非常近似的）周期。注意图中的地球（拉丁文"地球"（Tellus）在这里用了属格（Telluris））与其余行星不同，它带着一颗卫星绕太阳旋转。文字说明为"5.连同月亮一起做周年公转。"

> 在所有行星的中心居住着太阳。在这个位置它可以一瞬间照亮整个宇宙。对于这最壮丽的神殿，谁能将这盏明灯安放到另外或更好的地方？事实上，将太阳视为宇宙的明灯十分贴切。另外，它也是宇宙的心灵，并一直是宇宙的统治者。至尊的赫耳墨斯（Hermes）被称为"看得见的上帝"，而索福克勒斯（Sophocles）在《厄勒克特拉》中则被称之为"万物的洞察者"[1]。于是，太阳就好像坐在王座之上，统治着围绕它旋转的整个行星家族。

哥白尼对宇宙学说的陈述不超过《天体运行论》第一卷的一半篇幅。其余百分之九十五都是令人望而生畏的数学证明，说明日心假说能够带来的益处——它可以成为无"对点"数理天文学的基础，在行星表的计算上至少能和托勒密的《至大论》一样有效。13个世纪之后，托勒密终于在自己的游戏中失败了。

《天体运行论》一书结构的复杂性会影响人们对它的接受。它试图在一卷的篇幅中，不仅提供数理天文学和能使行星表的计算达到新的精度的几何机制，而且要明确它们对革命性宇宙论的支持，甚至还拿出几页，给了破坏自己宇宙论的、匿名的、完全误导的前言。宇宙论非常需要一个评论家，但是半个世纪以来，除了赖蒂库斯以外，没有什么别的高水平的评论家露出端倪。

（杨泽忠译，江晓原校）

① 此处哥白尼的引述不很准确，索福克勒斯不是在他的《厄勒克特拉》而是在《俄狄浦斯在科罗诺斯》一剧中将太阳称为"万物的洞察者"（第869行）。——译者注

第五章　从几何学到物理学：天文学之转变

1543年，哥白尼《天体运行论》的出版，标志着开始于公元4世纪柏拉图的致力于发展能重现行星运动观测事实的几何模型之论战达到高潮。此论战的目的是揭示行星在固定的恒星背景下的运行规律，这样，它们未来的位置便可以被预测了。其主要的兴趣，在于行星是如何运动的，而不在于是什么使它们运动的。

这些几何模型的基本组成部分是匀速圆周运动。也就是，行星运动被分解成了一个个的圆周运动，这是因为圆周可以无限地增加，模型的参数就能够在没有



第谷·布拉赫

50岁时的第谷·布拉赫（Tycho Brahe）。第谷·布拉赫1546年12月14日出生于丹麦的斯科纳（现属瑞典）。他出身一个贵族家庭，因此不需要什么职业，30岁前他在多个大学学习过，并伴之以广泛的旅行以及日益增长的天文学爱好。1576年，丹麦国王给予他汶岛（Island of Hven）的管辖权，他在那里建造了基督教欧洲第一个主要的天文台。在汶岛的二十多年里，第谷发展了精度不断提高的仪器，利用这些仪器，他和他的助手们编纂了前所未有的完整而精确的观测记录。但是丹麦国王去世后，第谷的处境恶化，1597年他离开了汶岛，两年后到了布拉格，在那里找到了新的赞助人——皇帝鲁道夫二世（Rudolf II）。他于1601年10月24日去世于布拉格附近，他的工作由一年前来做助手的约翰尼斯·开普勒（Johannes Kepler）接替。

精确观测的情况下得到改善。

所有的这一些都将在哥白尼1543年去世后的世纪里发生改变。哥白尼在方法上和技术上曾经是一个传统主义者。但是他的《天体运行论》播下了革命的种子——何以稳定的地球不仅可以旋转，而且当它疾驰穿过空间时，它的乘客为何根本感觉不到正在发生的一切。

确实，首先地球是怎样成为球形的呢？对亚里斯多德来说答案是简单的：任何土质的已离开了它们在宇宙中心自然位置的物体，都要自然地向其中心运动，因此，聚集成一个近似的球体是不奇怪的。哥白尼只能够提出这样的解释：地球质的物体聚集在一起形成作为行星的地球，就像金星质的物体聚在一起形成金星一样。

为了解释地球的周日运动，哥白尼推断地球是个自然的球，自然的球就会自然地旋转。他也许已经想到了地球是嵌入到一个巨大的看不见的球体里面的，这个球旋转带着地球在它的周年轨道上绕太阳旋转。但他的这种观点是不明确的。显然，他改进了运动学问题的解决方案——行星是如何运动的——只是产生了动力学上的新问题——是什么原因使得它们运动。

在求解这些无法回答的问题引起的变动中，出现了四个关键的人物，他们分别有着不同的国籍和不同的才能。第谷·布拉赫是丹麦的观测者，他主要的贡献在于他给出了精确和完备的观测。约翰尼斯·开普勒是一个德国数学家，他将天文学从几何学的应用转换成了物理动力学的一支。伽利略是意大利的物理学家，他利用望远镜揭示了天体从开天辟地以来就隐藏着的真相，并且发展了运动的新概念，巩固了哥白尼的主张。勒内·笛卡儿（René Descartes）是法国哲学家，他构想了一个无限的宇宙，在这个宇宙里没有什么位置和方向是特殊的，太阳只不过是我们的区域性的恒星而已。

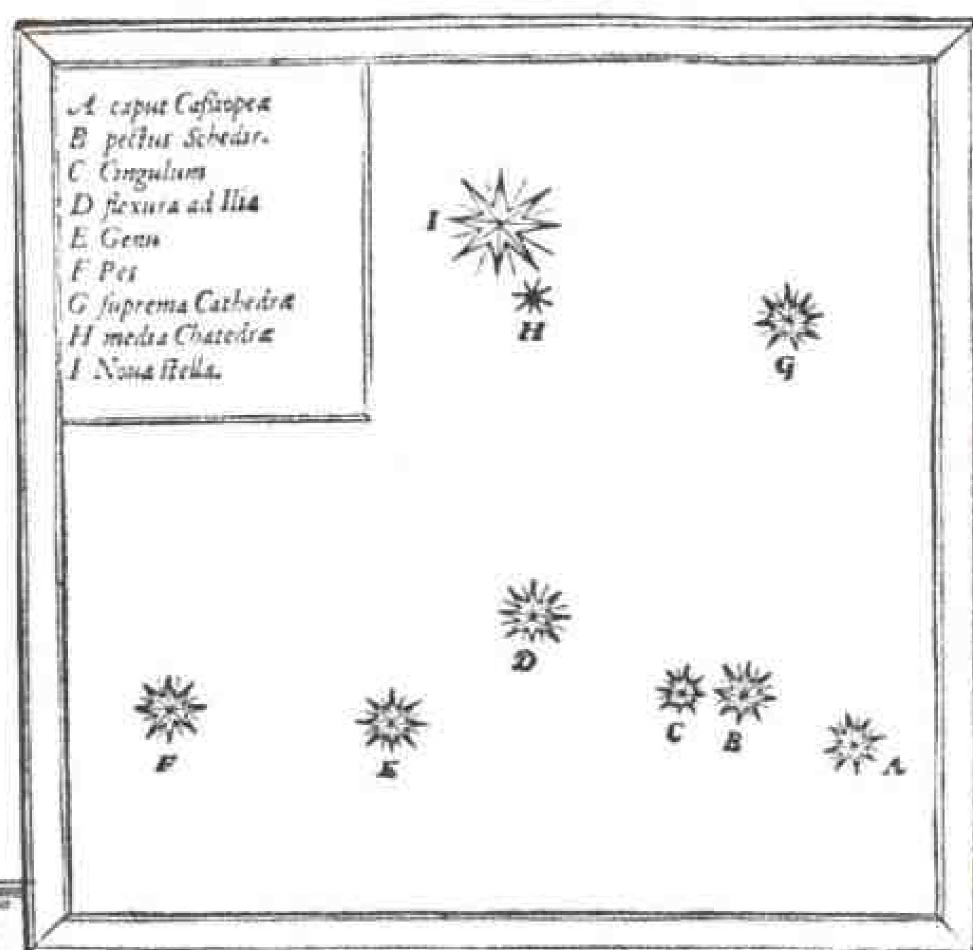
第谷·布拉赫和他对精度的追求

哥白尼不加批判地使用了那些容易得到的以前天文学家们的观测；实在必要时他才自己进行观测，其精度也只是他使用的仪器所能达到的。在16世纪后面的几十年中，第谷·布拉赫（1546—1601年）将给天文学家们的观测带来一场革命。

第谷出生于一个丹麦贵族家庭，但是他是在爱好学术的叔叔的家里长大的，因此得以摆脱封建生活的限制，得到自由发展。他从一个大学徘徊到另一个大学，由于有特权的出身，可以免于通常的谋职压力。到了1563年，当木星20年来第一次追上土星，两颗行星慢慢地在布满恒星的天空背景中运行时，16岁的第谷已经对天文学上这种“合”（conjunction）的简单观测十分感兴趣了。他发现公元13世纪《阿尔方索星表》（根据托勒密行星模型计算出的）对于日期的预测误差达到一个月，即使基于哥白尼模型的《普鲁士星表》也有两天的误差。这使他确信必须在精确观测的坚实基础上，对天文学进行一次改革，而这样的精确性只能来自经过改进的仪器和经过改进的观测技术的结合。

第谷绘制的1572年著名的仙后座新星图。他用半六分仪（参见本书第98页图）测量了各星之间的角距离。注意这里字母被用来标识诸星、参照仙后和她的坐椅的特点。现代天文学家则用稍后约翰·拜尔（Johann Bayer，1572—1625年）给出的清晰的希腊字母来标识它们。约翰·拜尔是德国的一名律师、也是业余天文学家，他给各星座的每一颗恒星标上一个希腊表中的字母（如果需要的话再继之以拉丁字母）。

拜尔《恒星志》(1603年）中的一张用希腊字母标示的恒星辨认图，显示的是仙后座。非常亮的一颗星就是1572年的新星。从它爆发到《恒星志》出版这中间已经经过了很长时间。右图所示第谷绘制的星图中右端的A星——仙后之首，在下图中已经成为仙后座ζ星。



1572年新星和1577年大彗星

随后，第谷不断寻找天文学的伙伴，包括业余的和专业的，同时作为观测者他也迈出了重要的一步。在1572年11月，大自然送给了人类一个惊奇的现象：一个像星一样的物体，亮得足以在白天都能被看见，它出现在仙后座的位置上。它看起来是什么？是颗新星？新的天体是前所未闻的，还有迫不得已的原因，使得考虑天空中的新生事物是不可能的——被认为是权威的亚里士多德的宇宙学，是建立在这样的基础上的：永恒不变的行星和恒星天区（这样就不可能有新星会爆发——译者注），与可变的四元素中心区域是截然分裂的。

如果这颗"新星"出现在十年前，从相互对立的观点中可能得不到一致的结果。在1572年，第谷使用的天文学仪器无论在刻度上还是在质量上都还不是出类拔萃的，但是他对于这个物体是"固定的"或接近固定的这一点很有信心（这意味着该物体位于恒星天区——译者注）。这表明了它在月亮上面很远的地方，所以是天体。

更重要的是，他认识到了问题的关键：这个幽灵是和已被人们接受了的彗星理论相矛盾的。因为彗星"来了还会走的"，这样就意味着四元素区域的特点在变化，这种假设从亚里士多德时代开始就有了，认为彗星是地球质的物体，而不是天体；对它们的研究不属于天文学，而是属于"形而上学"。天文学家在观测彗星时很少测量它的高度，因为答案是已有的。但是，第谷现在证明了这种变化是发生在天上的。因此他自己许下诺言，如果有一天彗星出现，他将仔细测量它的高度，看它是否真是地球质的。

1577年，大自然满足了第谷的这一愿望：一颗明亮的彗星真的出现了，第谷的观察也表明它是天体。更精确的是，它位于行星际空间。然而，如果是这样，它就是正在毫不费力地穿过被认为携带着行星绕着中心地球运动的那些看不见的天球。这使第谷彻底明白了：这些球体实际上是根本不存在的。

这个发现对于下一代人约翰尼斯·开普勒来说影响是深刻的。几乎没人在天球携带着行星旋转的解释中看出什么重大问题：如果"天使的智力"（指天使们推动天球旋转——译者注）不再是可接受的，那么也许哥白尼是正确的，自然的天球是自然旋转着的。但是，如果这个天球球体是不存在的，行星是在轨道上独立运行着的天体，那么这对于解释它们运动的原因将是很困难的。结果为了给出一个答案，天文学家不得不从运动学转向动力学，从几何学转向物理学。

第谷出版了他对于1572年新星观测的一本小册子，但他的小册子并没有带来多少冲击。关于1577年大彗星的问题，他决定要让人们知道，并且清楚地知道。当成百的作者急于证实可怕的幽灵所带来的惶恐时，第谷准备了一份超过了200页的关于他的观测的精密分析，还附录了一份更长的对于来自其他观测者的观测结果的批评。这是一部木版的大书，当它最终在1588年出版时，彗星从气象学到天文学的转变也确定了；[①]随着这种转变被承认，关于天空的变化就再平常不过了。对于1572年新星的第二次——这次将是非常彻底的——研究，第谷同时代的

① 这里的意思是说，由于第谷证明了1577年大彗星不是大气层中的现象，而是在行星际空间，所以它就不再是气象学研究的对象，而是天文学研究的对象。——译者注

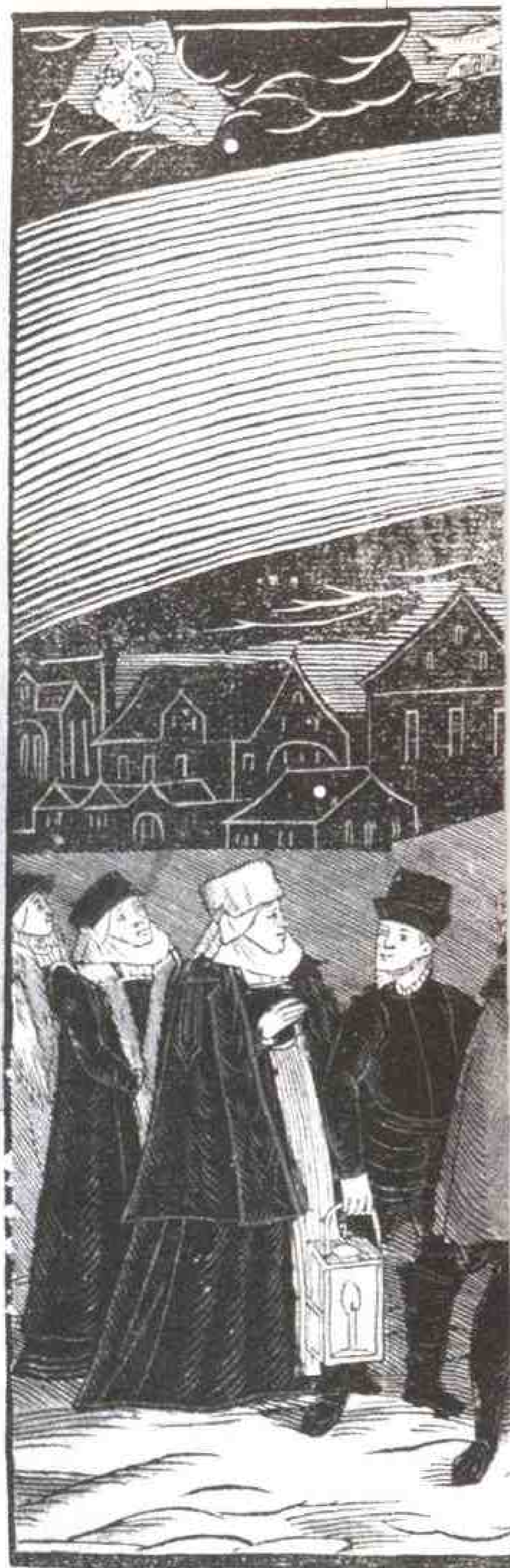
亚里士多德关于彗星的教义

在《气象学》中，亚里士多德讨论了四元素中最上层的元素——火及其和旋转天球相邻部分接触的结果。他认为火（他歉然表示这是一个无法令人满意的名字）作为一种燃料，"圆周运动无论何时以何种方式搅动起原料，它必定在最可燃烧之点燃起火焰"。依他的观点，火元素的全体，和大多数在它下面的气元素，都被旋转着的天体带动着，"在此运行过程中，无论处在何种连接部位，它经常被点燃"，有时候是因为某个特定的恒星或行星的运动。这就导致了流星和形态各异的彗星。

亚里士多德关于彗星与其说是天体不如说是气体的教义，从未受到过严峻的挑战，直到第谷时代。



1531年的一块木刻，显示了对那年出现的一颗明亮彗星的亚里士多德式的解释。这个彗星（实际上是哈雷彗星）接近太阳是8月26日，一个月前它穿过了大熊星座（包括北斗七星）。



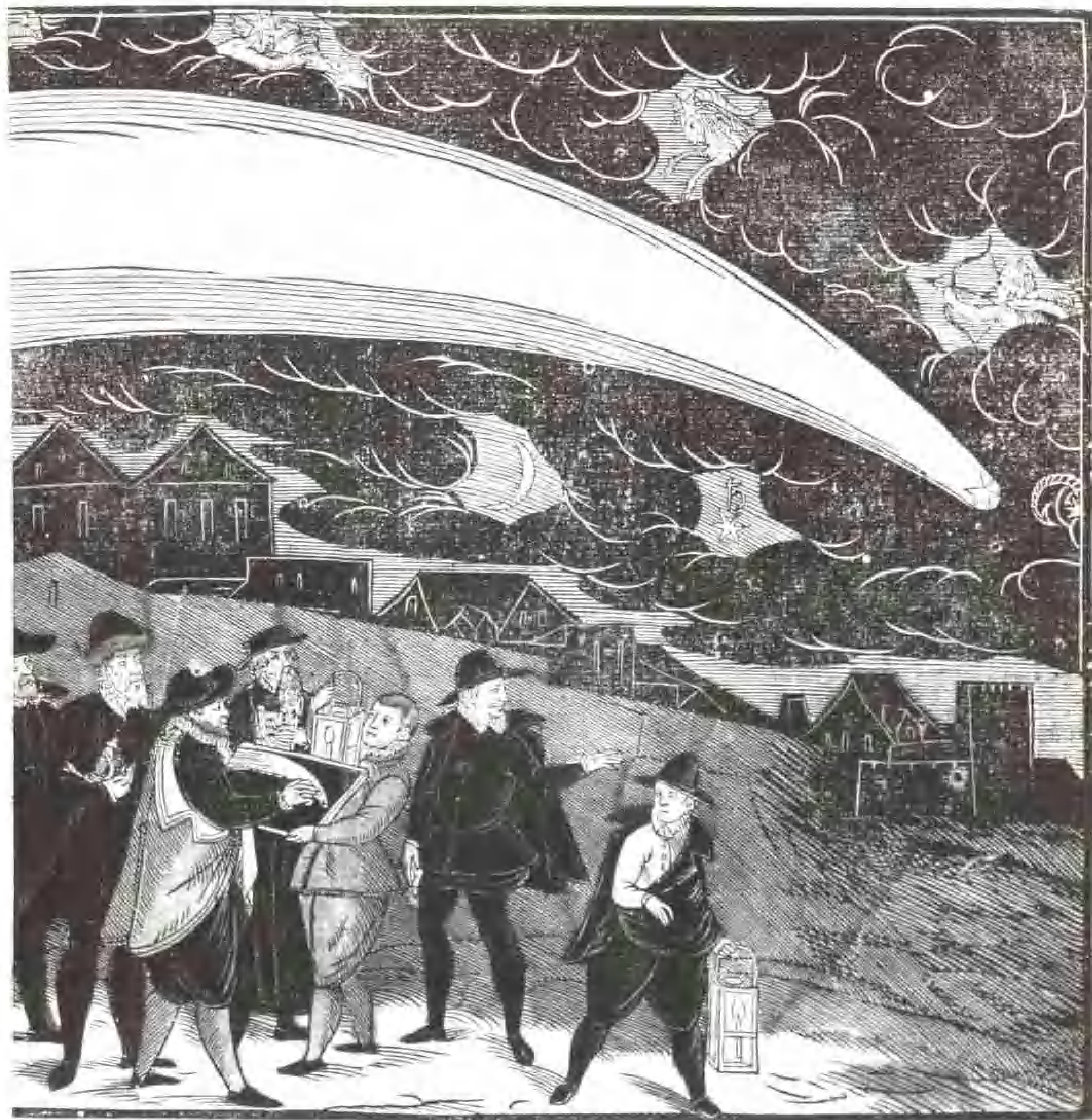
人们不得不再次经历严峻的考验——尽管这项研究直到第谷去世后的1602年才出现。

这两项论述——它们形成第谷问世著作的大宗——致力于提醒其他观测者，如今新的标准已被应用。第谷自己对新星和大彗星的观测，使用的是商业上可以得到的仪器；但是直到大彗星出现之际，第谷一直在致力于仪器和观测技术的改革。为此目的，他将需要王室级别上的资金资助。

1577年的大彗星。在这张印刷于布拉格的画面中，彗星的尾巴被描成从土星一直拖到月亮。一位画家正在描绘这颗彗星，他的助手们端着画架、提着灯笼为他照亮。

汶岛上的天文台

令人吃惊的是，钱的问题解决了。1575年，第谷拜访了黑森伯爵威廉四世（Wilhelm IV）——他也是一个非常热心的观测者。可能是在伯爵的推荐下，次年第谷被丹麦国王授权掌管了在丹麦海峡的汶岛。在那里，第谷有了空间、时间

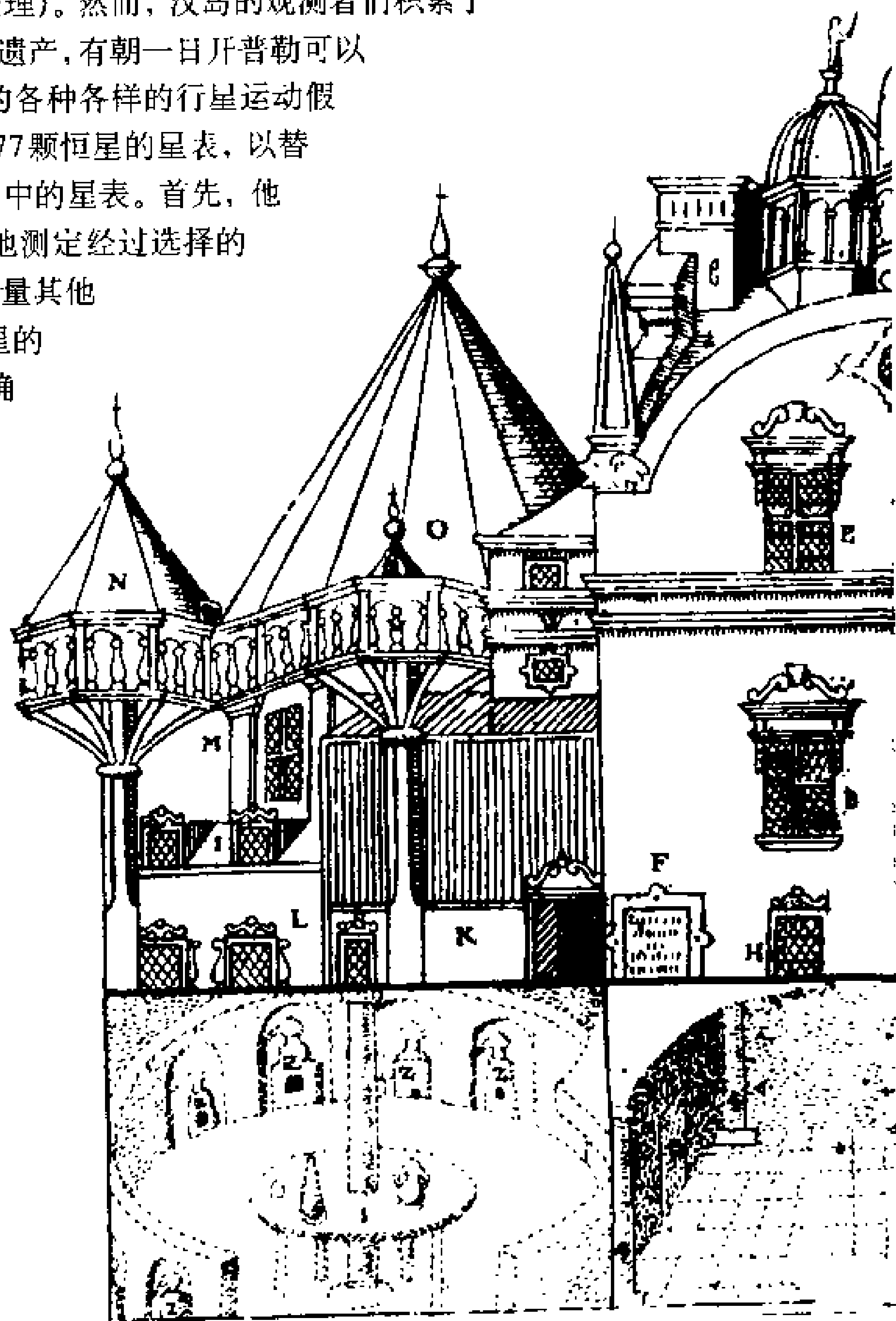


和财政来源，建立了基督教欧洲的第一个重要天文台。

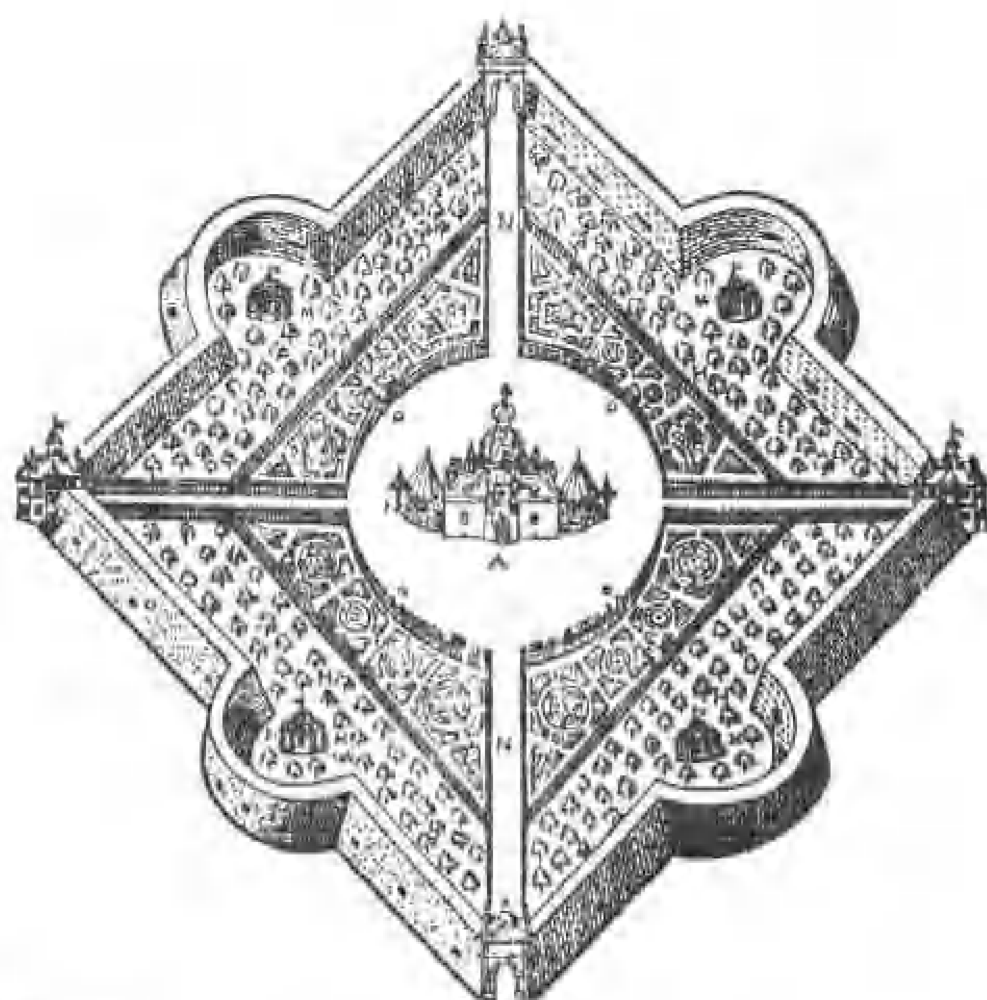
在他的岛上，第谷为自己准备了一个观测者所需要的所有东西：设计和建造

新仪器的房间、专为观测而建造的房间、他自己和助手的宿舍，甚至还有造纸厂和印刷所，这样第谷就可以自己出版他的观测结果。当这第一个天文台——天堡（Uraniborg，意为“天之城堡”）——被证明太小时，第谷又在附近建造了第二个——星堡（Stjerneborg，意为“星之城堡”）。[1]年复一年，第谷建造、测试、调整、再测试……他的不同类型的仪器，直到能够使测量精度高于1′（1°的六十分之一）。

与此同时，第谷，特别是他的助手们，持续着紧张的观测程序，创造出前所未有的精确、可靠、完整的观测资料宝库。大量的观测是在16世纪的80年代和90年代早期进行的，那段时间里，第谷和他的团队每四天就工作一晚上。观测大多数是在冬天的月份。尽管第谷之前的人已经乐于按照要求的数量进行单独观测，但是在汶岛，用一整套仪器进行多重观测是很常见的。另一方面，第谷对仪器性能的兴趣经常不亚于他对观测本身的兴趣，因此，大多数的测量还保持着原始状态（未经处理）。然而，汶岛的观测者们积累了大量的资料，形成了一份遗产，有朝一日开普勒可以利用这份遗产来检验他的各种各样的行星运动假说。第谷还编纂了一份777颗恒星的星表，以替代来自托勒密《至大论》中的星表。首先，他和他的助手尽可能精确地测定经过选择的“参照星”的位置，接着测量其他恒星相对于适当的参照星的位置。因此，该星表的精确性首先取决于参照星网络的精确性，到了16世纪80年代晚期，第谷测定这些（恒星之间的）角距离和真值之间的误差已经小到半弧分左右（即30″——译者注）。尽管那些不在参照星网络之内的最亮恒星，其位置几乎已经精确到了他



[1] 第谷为两座天文台所取之名，皆有来历。天堡名Uraniborg，源于希腊神话中女神Urama之名——她正是九位缪斯中掌管天文的。星堡名Stjerneborg是丹麦文，拉丁文为Stellaeburgum，得名于拉丁文stellae，即恒星之意。——译者注



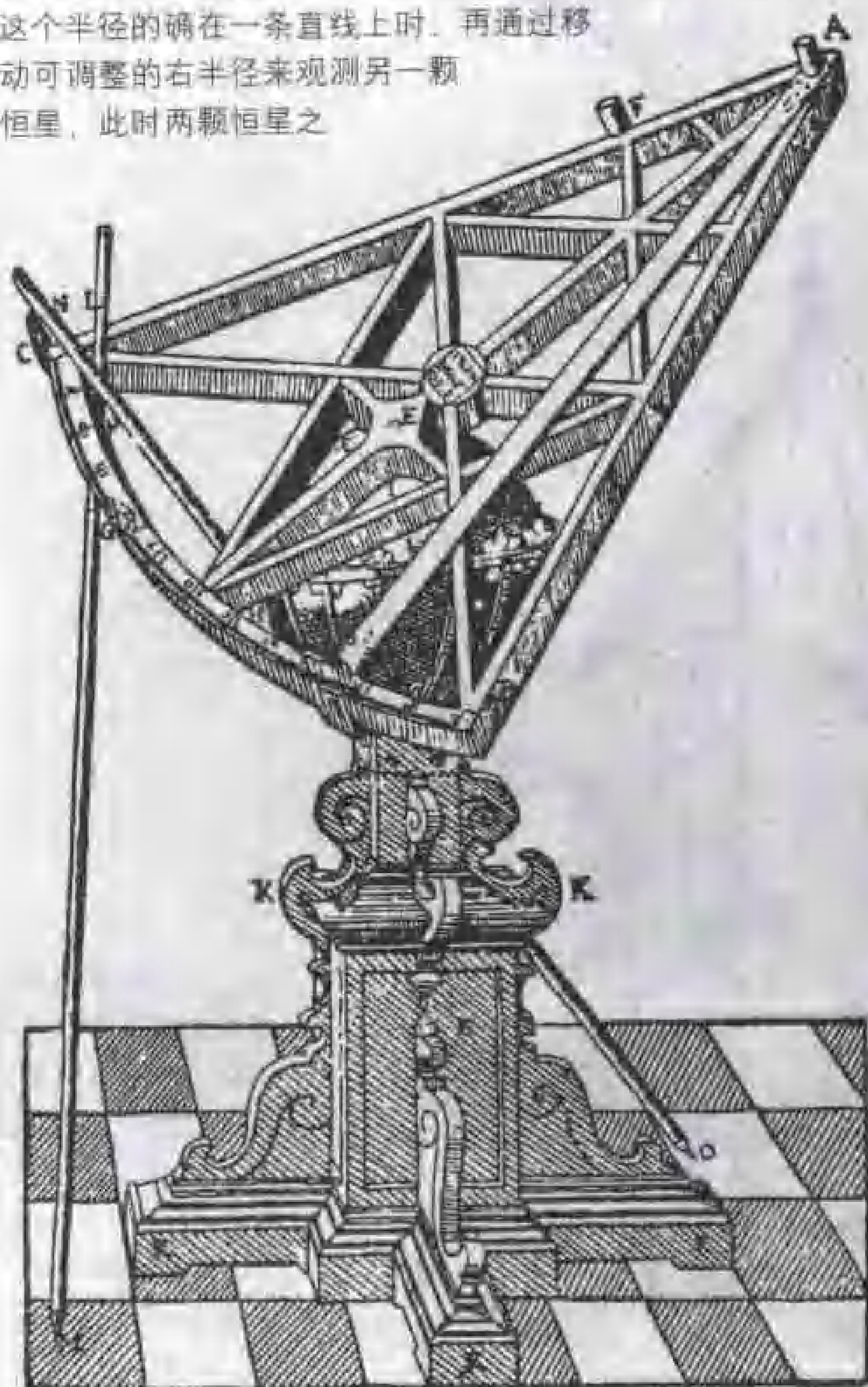
从东面看天堡的地形图。天文台在中心位置，周围是被高墙保护着的装饰性的花园（大约有三百棵树）。在东端和西端是两个门，那里有警戒的犬舍。北端是仆人们的住所，南端是一个印刷所。岛上还有一个造纸厂。

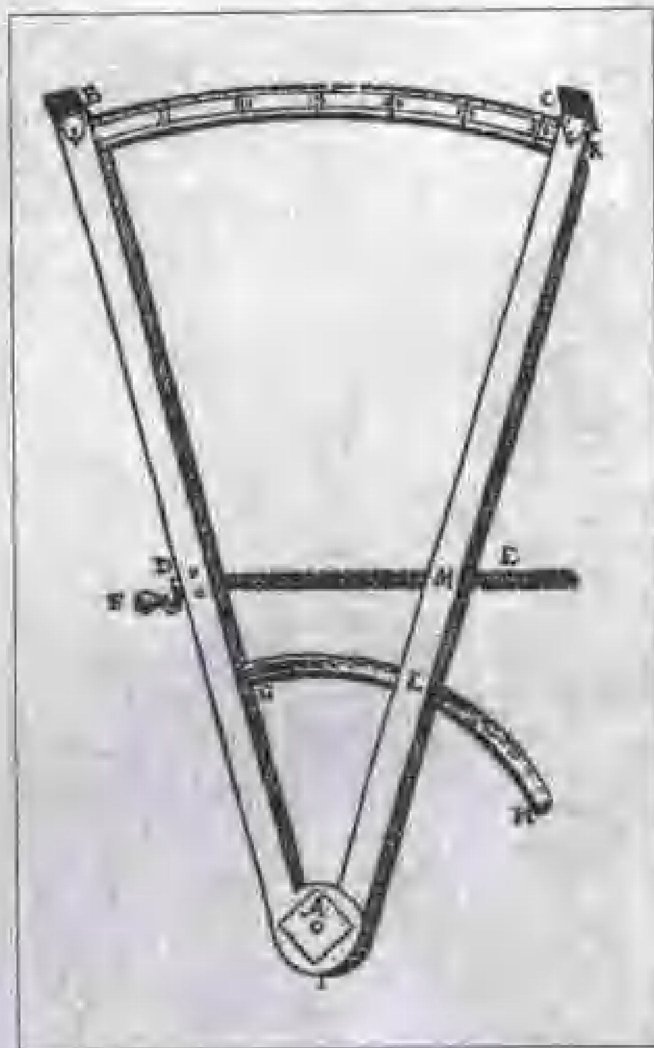
从东面看到的天堡。楼的顶层是助手的八间卧室。在主楼最上层是四个观测房间（有圆锥形屋顶），两个在南端，两个在北面。在它们中间是各种房间，包括一个临海的夏季餐厅。底层是图书馆（置有大天球仪）、厨房、冬季餐厅和三个备用卧室。地下室是炼金术实验室。天堡的建筑动工于1576年，至1580年完成。

作为标准的1弧分，但是较暗恒星的位置精度就差一些，有不少误差。看来，一旦黄道恒星——作为将来行星观测的参考位置是特别重要的——测定之后，第谷

第谷的六分仪

为了测量两颗恒星之间的角距离，中世纪晚期的天文学家使用了木制的十字仪（参见本书第75页），但十字仪有个缺点，即要求观测者同时观测两颗星，第谷发明的六分仪克服了这个缺点。六分仪之得名，是因为仪面为一个圆周的六分之一。右图所示是一个手持的半六分仪，第谷曾用它来确定1572年新星与仙后座诸恒星的相对位置。观测者沿着左边的半径（固定的）先观测第一颗恒星，当他认为这个恒星和这个半径的确在一条直线上时，再通过移动可调整的右半径来观测另一颗恒星，此时两颗恒星之间的角距离就可以在刻度盘上直接读出来。

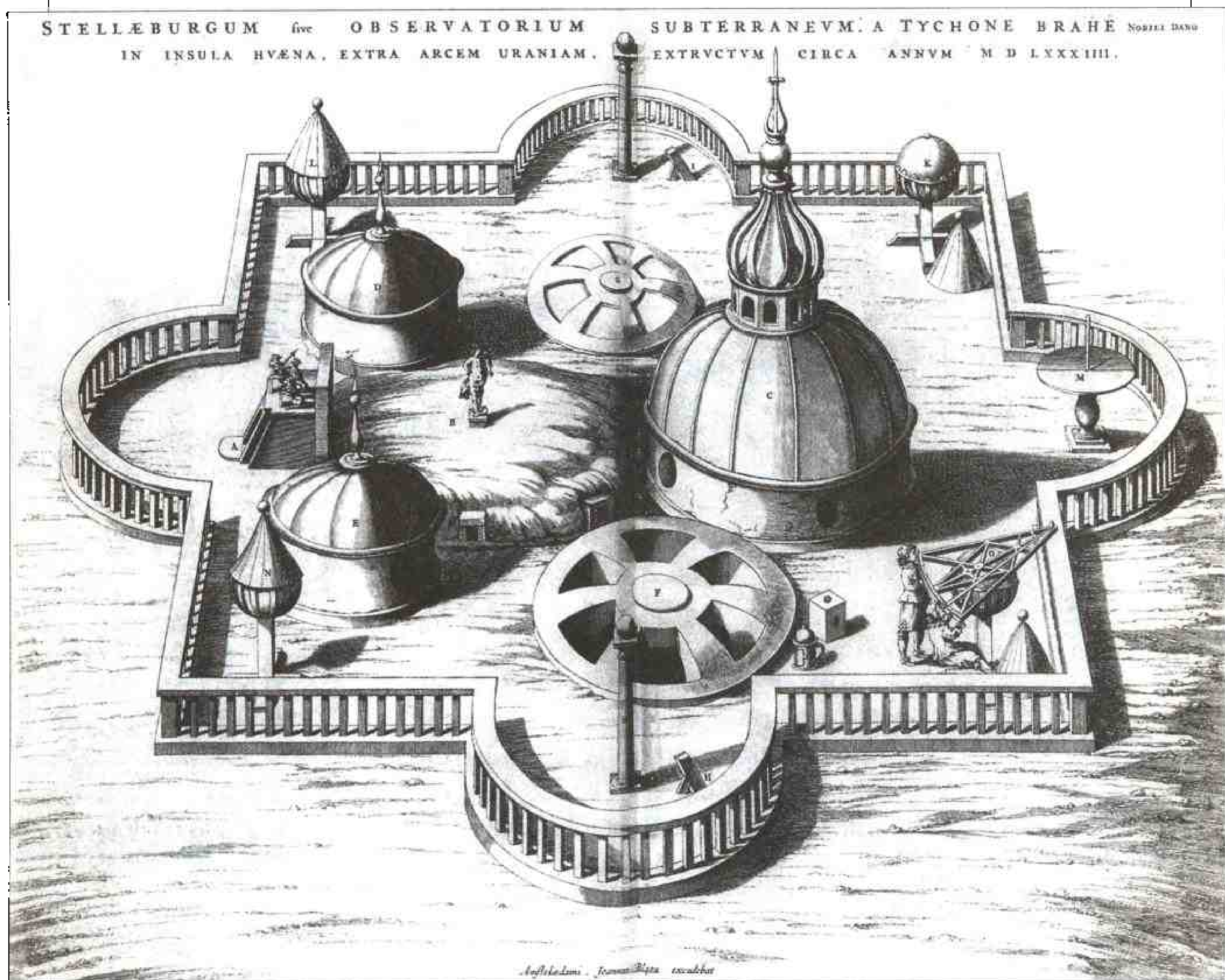




经过又一个十年的试验，第谷使这个仪器取得了更大的改进。一个成熟的例子如左图所示，它安放在一个固定的球（一种万能接头）上。观测的方向反了过来，观察者现在要从弧的外面向中心看，这样可以使两个人同时进行观察（正如我们在本书第99页的星堡图中看到的样子）。一个人沿固定的半径观测恒星，并且一旦恒星和这个半径共线后就将仪面固定在那个位置上，此时另一个观测者沿可移动的半径来观测另一颗恒星。它也可以允许第二个观察者进行微调。照准和刻度也有了很大的改进，尽管它们在图中显示得不明显。

星堡：星之城堡

第谷·布拉赫的星堡天文台（下图），是天堡的石头版本，建于1584年，用的全是泥瓦技术。它的房间在地面以下，这样可以使仪器避风。第谷试图建立一个地下通道将天堡和星堡连接起来，但始终没能实现。这样观测者只好从天堡步行，然后从北面下到地下建筑（中心的左边），沿着台阶进入加热的房间。这样他可以穿过五个房间中的任何一个，每个房间都装置有一架主要仪器：观测是通过地面的窗口和可转动的房顶进行的。地面上的围墙对临时安置的仪器起固定保护作用。因此（在右前方）我们看到两个观测者正在使用安置在一个球上的巨大的六分仪。这样的两个天文台，使第谷确保了由不同的小组或助手所进行的测量是真正独立的。



格利高里历法改革

因为亚历山大里亚的基督教教堂继承着天文学的一个重要传统，即3月21日春分（太阳穿过天球赤道之日）被视为一个重要日期，被用于各种场合，如确定何时庆祝春季的复活节。

然而，那时所使用的历法是公元前46年由儒略·恺撒（Julius Caesar）引进的儒略历，这个历法每四年有一个闰年，没有例外。但是因为回归年事实上比365.25天要少11分钟，这样到了中世纪晚期，这个误差就积累到了明显的程度，以致春分在3月21日前若干天就到了。因此天文学家和教会人士都呼吁进行历法改革。

到了16世纪70年代，教皇格里高利十三世（Gregory XIII）成立了一个委员会来解决这个问题。最终的结果是以教会法令的形式颁布于1582年，该法令规定了经过修改的复活节计算规则。但是对于外行人来说，最引人注目的变化，是使春分日恢复到了3月21日——从1582年10月中删去10天，并且能将春分保持在这个日期附近（通过使逢100及其倍数之年不设置闰年，而逢400及其倍数之年仍设置闰年）。这就是我们现在使用的格利高里历法。

天主教国家立即采用了这项改革，英格兰的伊丽莎白女王（Queen Elizabeth）也想这样做，但是她的主教不允许，这就引起了混乱。比如说艾萨克·牛顿（Isaac Newton），他出生在儒略历（"旧历"）1642年的圣诞日，但在天主教欧洲的那一天，1643年已经开始了（"新历"）。由于历法导致观测日期的混乱，连牛顿自己也弄不清如何计算1680–1681年的哈雷彗星的轨道了。

英国最终在1752年采用了格利高里历。按照新规则，1700年没有闰年，这时需要删掉的天数已经增加到了11天。1753年，欧洲最后一个国家瑞典也采用了新历。俄国一直抵制新历法，直到布尔什维克革命（当时删去了13天）。即使现在，教会正统的复活节计算法还是按照儒略历。

就失去了工作热情。星表最终在他身后，在他的关于1572年新星的著作的第二版中问世。

第谷体系

每个天文学家都是潜在的宇宙学家，第谷也不例外。对我们来说，第谷在观测方面的改革是他最大的成就，因为它给天文学带来了对事实的尊重，这在我们看来是具有现代科学特征的。但对于他自己，令他最自豪的也许是他提出的被称为"第谷体系"的宇宙论，这个体系很快取代了托勒密的宇宙体系，成为最流行的地心宇宙图像。第谷颇能欣赏哥白尼宇宙学说的优点，但他又是个十足的传统主义者，他认为哥白尼那样做的代价太高了。因此后来的伽利略佩服哥白尼敢于"对感觉实施如此暴行"，让地球动起来；而第谷的脚跟坚定地站在大地上。作为一个新教徒，他从《旧约》的某些篇章中看到了哥白尼的困难。建立在上抛物体行为——将一支箭垂直射向空中，它会回到原地，表明地球不动而箭在飞行——之上的关于地球静止不动的古老论证，在他看来其有效性不减当年。并且即使借助于他的出类拔萃的仪器，他也没有发现恒星呈现出任何周年运动（"周年视差"），

October 1582

Motus Planetarum Diurnus

Anni veteris	Anni Gregor.	☉ ♎ P	′	″	☽ ♈ P	′	M A ♄ ♓ P	′	M A ♃ ♒ P	′	S A ♂ ♋ P	′	S A ♀ ♍ P	′	S D ☿ ♎ P	′	☊ P	′
1	1	17	29	45	11	27	4	52	12	26	14	30	12	22	8	30	4	28
2	2	18	29	12	26 ♉	28	4	49	12	27	14	57	13	39	10	9	4	25
3	3	19	28	41	11	29	4	46	12	27	15	23	14	48	11	49	4	22
4	4	20	28	12	26	23	4	43	12	28	15	49	16	1	13	29	4	18
5	15	21	27	45	11 ♊	2	4	40	12	29	16	15	17	14	15	10	4	15
6	16	22	27	19	25 ♋	21	4	37	12	31	16	40	18	27	16	52	4	12
C 7	17	23	26	55	9	18	4	35	12	33	17	5	19	40	18	34	4	9
8	18	24	26	33	22 ♌	52	4	33	12	35	17	30	20	53	20	17	4	6
9	19	25	26	13	6	2	4	30	12	37	17	54	22	6	22	0	4	3
10	20	26	25	55	18 ♍	52	4	28	12	40	18	18	23	19	23	43	3	59
11	21	27	25	39	1	21	4	26	12	43	18	42	24	32	25	2	3	56
12	22	28	25	25	13	33	4	24	12	46	19	5	25	45	27	11	3	53
13	23	29 ♏	25	13	25 ♎	32	4	23	12	49	19	28	26	58	28 ♏	55	3	50
C 14	24	0	25	3	7	20	4	22	12	53	19	50	28	11	0	40	3	47
15	25	1	24	54	19 ♏	1	4	21	12	56	20	12	29 ♎	24	2	24	3	43
16	26	2	24	47	0	39	4	20	13	0	20	34	0	37	4	8	3	40
17	27	3	24	42	12	17	4	19	13	4	20	55	1	51	5 M	52	3	37
18	28	4	24	39	23 ♐	58	4	18	13	8	21	16	3	4	7	36	3	34
19	29	5	24	38	5	46	4	17	13	12	21	36	4	18	9	20	3	31
20	30	6	24	39	17	45	4	16	13	16	21	56	5	31	11	4	3	28
C 21	31	7	24	42	29	58	4	16	13	21	22	16	6	45	12	47	3	24
Latitudo Planetarũ ad diẽ						1	1	27	0	46	0	14	0	56	1	24	Mensis	
						21	1	26	0	46	0	27	1	25	0 M	53		

Incidit in hoc menſe Octobris correctio anni,& reſtitutio Kalendarij Romani per decem dierum ſublationem, facta per Sanctiſſimum D.N. GREGORIVM diuina prouidentia PP.XIII. anno eius Pontificatus X, vt accommodetur Aequinoctium vernum,& ad eandem ſedem reſtituatur, in qua fuit tempore Niceni Concilij, ad diem nempe 21. Martij (quoniam iam ferè dies decem verſus initium Martij retroceſſit) ad hoc vt Paſcha, & reliqua feſta mobilia ſuis debitis temporibus congruant,& ſic omittendo decem dies tranſeundum eſt à die 4. Octob. ad diem 15. eiuſdem. Itaque ob hanc decem dierum detractionem litera Dominicalis mutatur hoc anno 1582. poſt diem 4. Octob. in C.

1582 年 10 月天文历书（星历表）中的一页。左起第一栏给出儒略历的日期，而第二栏给出对应的新历法的日子，4 号之后紧接着就是 15 号。

而这应当是在运动着的地球上能够观测到的。①

关于他未能发现周年视差的原因有两种解释。或者哥白尼是错的，地球上的

① 如果地球是绕着太阳旋转的，那么地球绕太阳的轨道直径就可以构成一个巨大三角形的底边。当地球在一年中从轨道的这一端运行到另一端，在此两端观测某颗离地球较近的恒星（这颗星作为上述三角形的顶点），则该恒星相对于远处的恒星，应该呈现出位置的移动，这就是“恒星周年视差”。——译者注



观测者事实上是静止的，或者是恒星太远了，以至于它们呈现的位移太小，依靠第谷的仪器还观测不到。第谷估计，在这种情况下，恒星应当比最外层行星远700倍或更多。这将导致行星和恒星之间有一个巨大的鸿沟——这样的话，恒星能够在那么远的地方还显得那么大，它必须拥有非常大的体积。对于第谷，这样的一个宇宙是难以想象的。

那么如何保留哥白尼宇宙学的长处，同时又免于陷入地球运动的可笑境地呢？事后看来选择是折衷的。我们看到的任何行星运动，都是相对于我们自身而言的，对于我们所见现象的任何几何解释，都是与究竟是地球还是太阳处在绝对静止这一点不相关的。因此，第谷如果保留哥白尼提出的相对运动的几何学方案，同时又宣称地球是绝对静止的，那他将兼具两大宇宙体系之长。

这一步现在看起来是显而易见的，但对当时的第谷却决不是这样。到了1578年，他已经取得了一半进展。在5世纪马丁内斯·卡佩拉描述的体系中，金星和水星是太阳的卫星，而太阳和月亮、火星、木星、土星一起以地球为中心旋转（参见本书第63页）。六年后，他开始考虑将所有的五大行星——水星、金星、火星、木星和土星——都视为太阳的卫星。但是这里有一个物理问题：即带动火星的球体将和带动太阳的球体相切。

最后他明白了，1577年大彗星畅通无阻地通过行星际空间，意味着这些球实

大墙象限仪

天堡的"大墙象限仪"（本书第102页图），被安置在一堵南北向的墙上。这个仪器包括黄铜的四分之一圆周，可以在超过六英尺半径、刻度精细到10″的圆周上进行测量。圆的中心是固定的准星，它被安置在墙的左边。有两个后视照准器可以在圆周上滑动。观察者（在图中最右边，只能看到一部分）可能就是第谷自己，正随着一颗恒星趋近中天而调整一个后视照准器到合适的位置，等候恒星上中天时刻的到来[①]，好在刻度盘上读出角度。时间由钟表（只有一个时针）旁的助手告知，角度和时间由坐在桌子前的第二个助手记录下来。尽管在画中的两个钟表是显著的，但我们知道第谷对于机械时计没有多少信心，他常常通过测量恒星来确定时间。

作为装饰，大墙象限仪上也画上了第谷和他忠实的狗。在背景中我们看到，在天文台的上层，其他的助手正在用各种仪器进行观测；在他们下面的图书馆里，更多的学生正在巨大的天球仪旁边工作（参见本书第104页）。底层是第谷用来做炼金术试验的仪器。

在第谷的画像上方，在墙的壁龛里，是一个固定在转轮上的黄铜天球仪，它能演示地球的周日旋转和太阳、月亮以及其他更多天体的轨道。在天球仪的两面是第谷的王室赞助人及王后的肖像。天球仪的上方是第谷藏书的一部分。

① 天文学术语"上中天"的意思是：一个天体在其周日运动（即每天的东升西落）中到达当地正南方（对北半球而言），或者说该天体经过当地子午面，此时它的地平高度达到一天中的最高值。第谷的大墙象限仪是装置在一堵正南北方向的墙上的，这样它就刚好位于当地的子午面内。——译者注



第谷的天球仪，它的木制结构不是在汶岛制作的，而是1570年在奥格斯堡开始制作的。它的直径约5英尺。1575年第谷访问奥格斯堡时，发现它有些变形，于是在裂缝里塞了些羊皮纸。之后他等了两年，看它是否能保持球形并承受得住季节温度的变化。发现还比较满意，他就给这个球覆盖了一个刻有黄道、赤道、黄极、赤极的黄铜外层。他在天球仪上标出了肉眼可见的公元1600年的一千个左右恒星的位置。

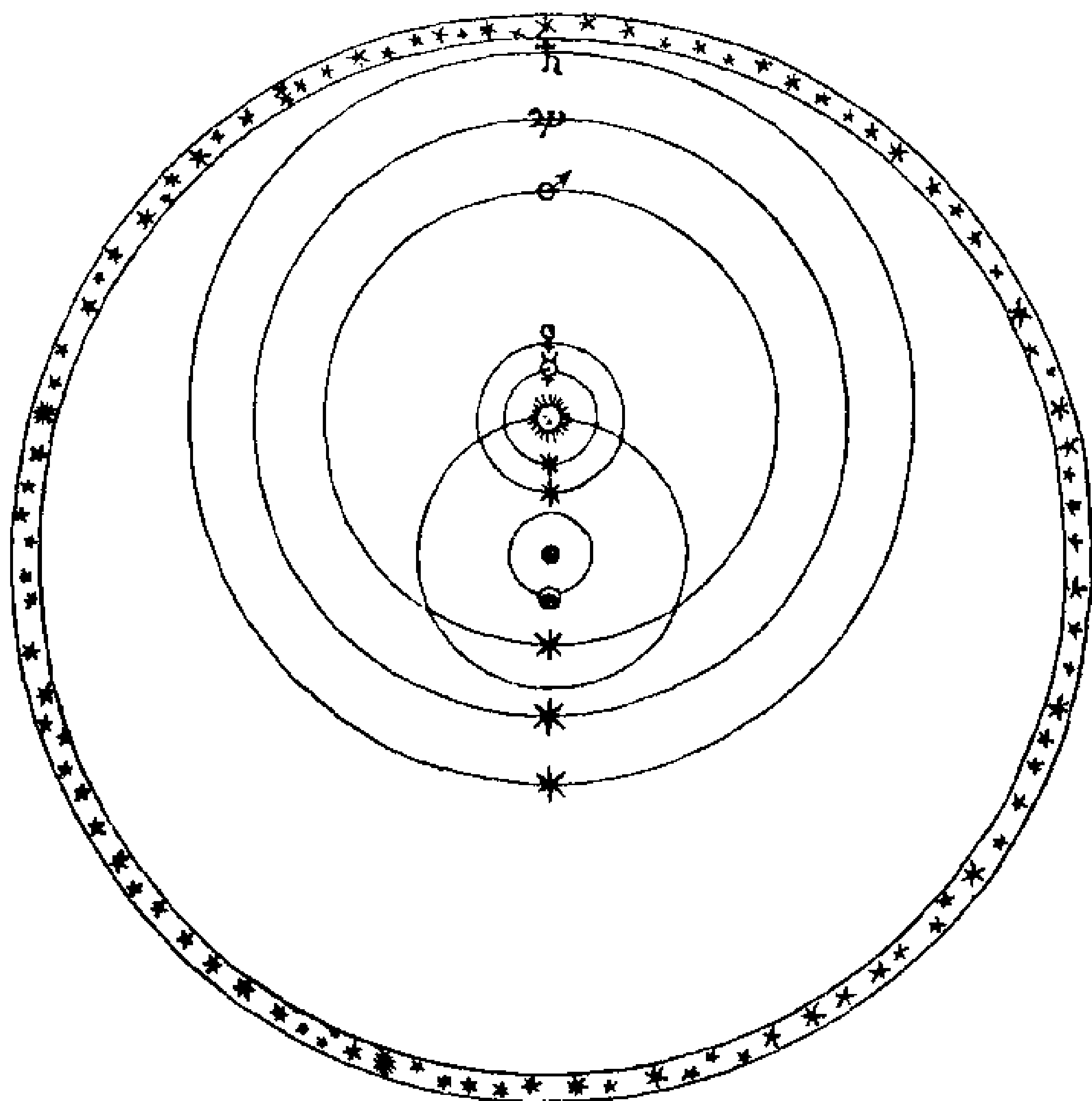
际上是不存在的。这样就没有什么因素可以阻止他将五大行星看作太阳的卫星了。1588年，在一本关于大彗星的书里，他粗略地公布了这个体系，同时也公布了关于太阳和月亮运动的详细的几何模型。

在第谷体系中，地球是静止的，位于宇宙的中心。它周围环绕着月亮和太阳。其他的五个行星是太阳的卫星，并且在太阳的带动下绕地球旋转。在最远的行星到达的地方之外是一层很薄的空间外壳，这个外壳以地球为中心，恒星就在这个外壳上。第谷的宇宙显得令人安心地紧凑，其半径相当于地球半径的14,000倍。即使是托勒密的宇宙半径也比它大一半。

梦醒时分

第谷的“天堡”始终是脆弱的，因为他只能依靠王家赞助人的热情来维持。1588年弗里德里希二世（Frederick II）的去世并没有立即带来变化，因为后来摄政的王室成员也被第谷的家庭和朋友主宰着。但随着时间的推移，年轻的克里斯蒂安四世（Christian IV）开始在政府中逐渐担任重要职位，汶岛的升平岁月将要结束的征兆就越来越明显了。1597年愤怒的第谷放弃了天堡，在经过了困难的两年之后，他穿过欧洲到达布拉格，开始为更欣赏他的赞助人皇帝鲁道夫二世（Rudolf II）服务。

鲁道夫极尽慷慨之能事，但此时的第谷已经失去了观测的兴趣。他的四个仪器仍然留在汶岛，剩下的最大的一个被收藏在马格德堡。他主要关心的是出版他过去研究的成果。第谷现在只有几个月的生命了，但就是在这几个月里，他再次向约翰尼斯·开普勒（1571–1630年）发出了先前已经发出过的邀请，请他前来担



第谷宇宙体系，地球是静止的，位于中心，月亮和太阳环绕着它。其它的五个行星是太阳的卫星，被太阳带动着绕地球旋转。在行星区域外是恒星。火星轨道和太阳轨道的相切，在物理上是可能的，因为据第谷看来，随着1577年大彗星的自由通过，已经表明天空中的球体实际上是不存在的。他的相对运动和在哥白尼体系中的情形一样，相对运动——比如被伽利略观测到的金星位相——的观测结果，对于哥白尼学派与第谷体系的鼓吹者之间的争论是中立的东西。

任助手，而这一次开普勒接受了。

开普勒和动力学的引入

17世纪早期和中期的天文学家经常对约翰尼斯·开普勒的著作是如何构成的感到困惑。他是他们中的异类，他总是很坦诚的公开自己的错误：不像他的现代同行那样，在出版自己的著作之前总是先“清洗”自己的求索过程，然后再人为地简化。开普勒需要他的读者分享他在发现之路上的胜利和失望。他在无数纸张上的计算中犯有错误，这些错误有时会导致他得出错误的结论。因为他所需要的数学技巧当时还不存在，他诉诸我们今天能够看出是有缺陷的计算程序。在动力学中，他是个过渡式的人物，他关于运动特质（idiosyncratic）的概念（根据这一概念，除非有一个外力每时每刻都在作用，否则行星就会立即停止运动），被下一代学者摈弃。他被宗教使命所激励，试图洞察作为几何学家的上帝的心灵。开普勒没有第谷·布拉赫在社会方面的优越之处。作为好吵架的父母的儿子，后来他

就像画这幅画的中世纪艺术家一样，开普勒相信上帝是个几何建筑师，上帝（用开普勒的话说）“根据规则和秩序处理了世界的基础”。上帝好像事先复制了他还没创造出来的人类的建筑方法。在他的天文学生涯中，开普勒一直试图识别出创世者在设计宇宙时所使用的几何关系。



不得不为免受巫术的指责而自卫。[①]他出生在斯图加特附近的魏尔市，就学于图宾根大学。尽管他打算当路德教的牧师，但他在图宾根大学的学习却以包括天文学在内的课程作为开始。当时的教授是米歇尔·马斯特林（Michael Mästlin，1550—1631年），一个特别有能力的数理天文学家，他——不

① 因为开普勒的母亲被指控犯有巫术罪，开普勒不得不花费几个月的时间来为他的母亲作法律辩护。——译者注

管他真正的偏爱何在——确实能使他的学生明白哥白尼假说的优点。开普勒在1591年开始了他的神学研究，但在第三年格拉茨的一个数学教师去世，他们请求图宾根大学当局为他们寻找一个接替者，于是开普勒得到了这个任命。开普勒极不情愿地服从了。

《宇宙神秘》

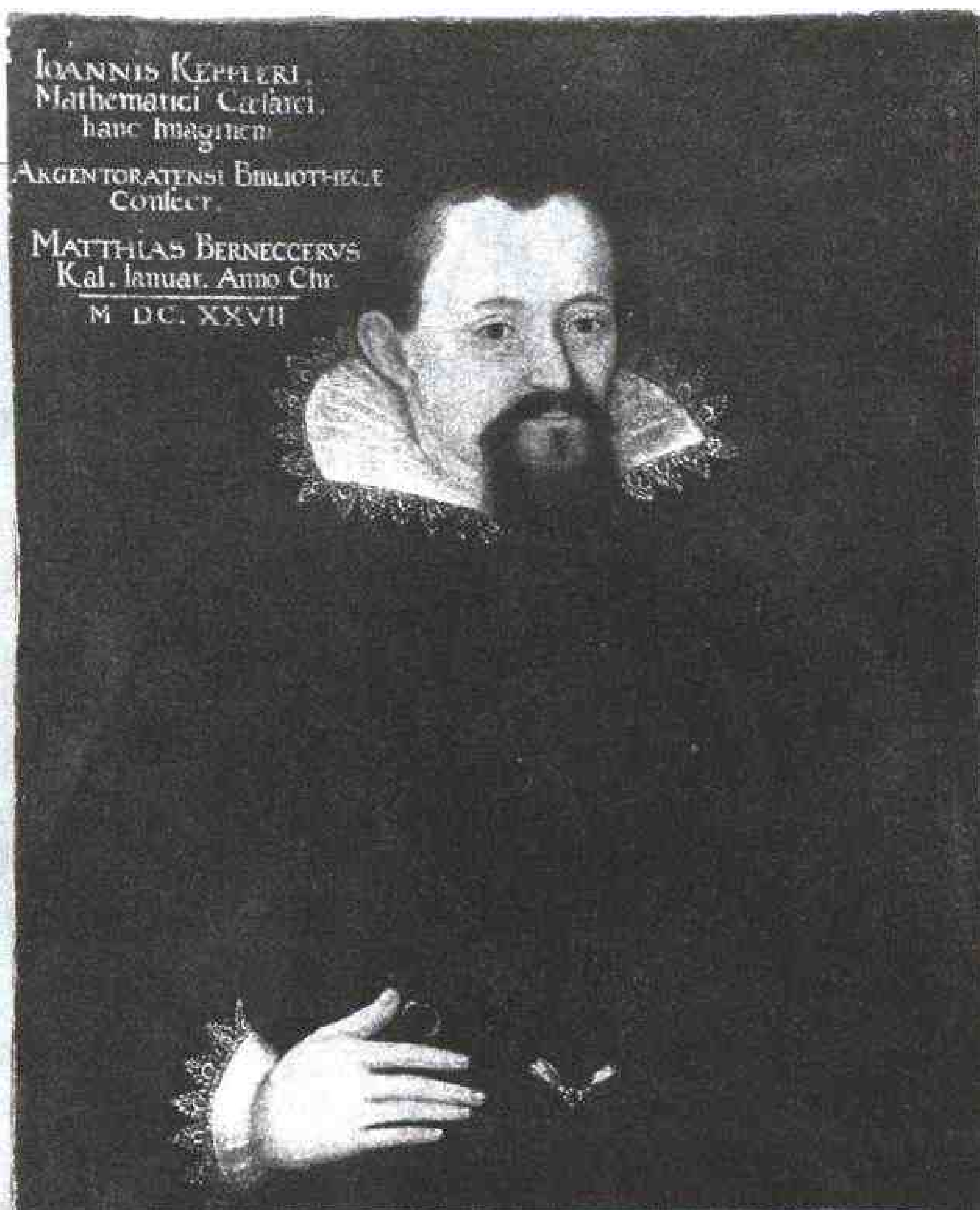
定居在格拉茨之后，开普勒开始考虑被上帝创造的宇宙。上帝在柏拉图传统中像很多东西，有时看起来是一个几何学家。哥白尼发现了上帝宇宙的布局——但未能发现是什么促使上帝选择了这种布局而不是其他的布局。

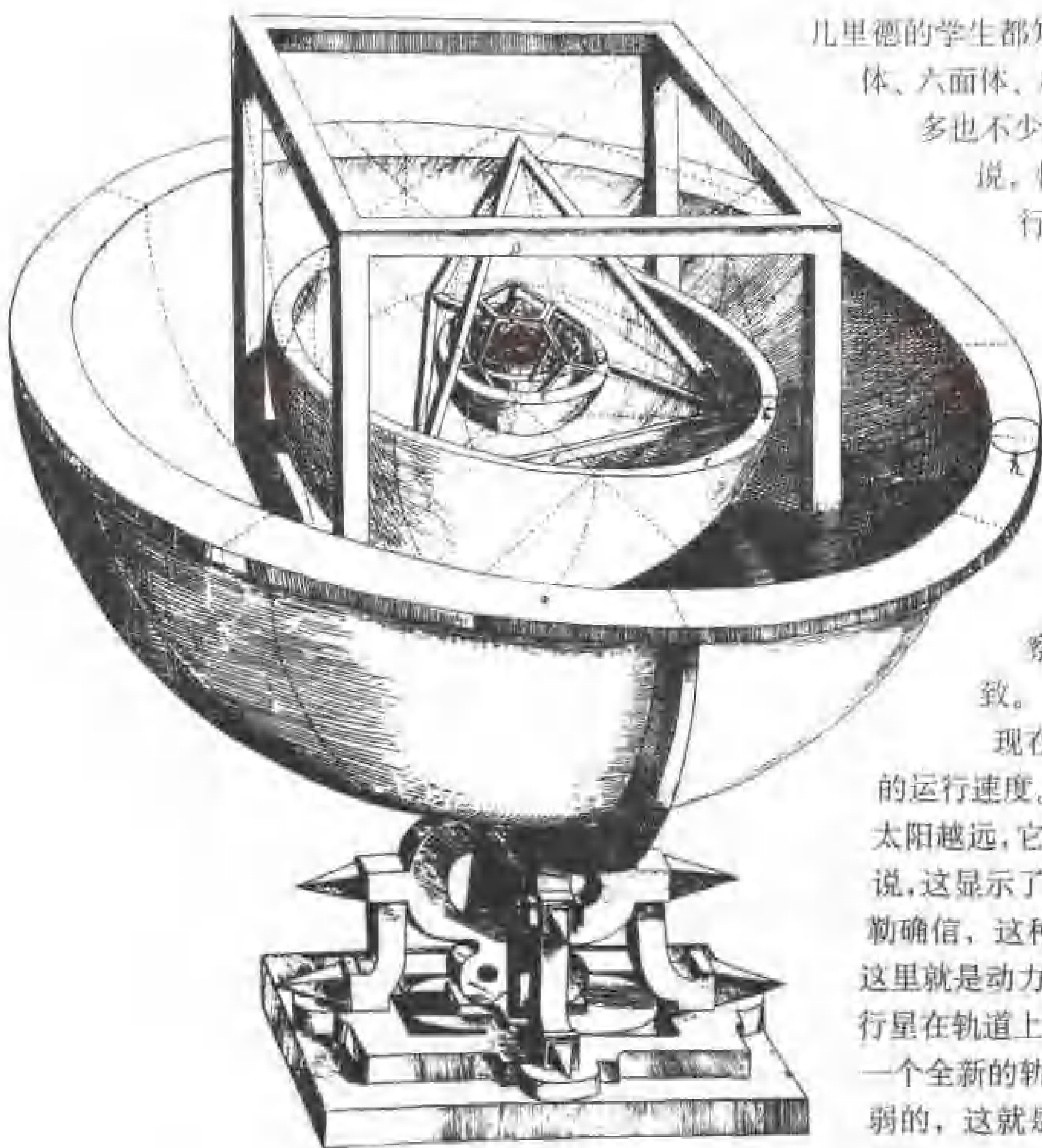
不动的部分——中心的太阳、外层天球和两者之间的空间——是容易理解的：他们反映了圣父、圣子和圣灵。动的部分——行星——理解起来就比较困难。为什么是六个（如哥白尼所发现的），而不是五个或七个？是什么使得上帝安排某个行星离太阳有一个确定的距离而不是别的距离？有一个确定的速度而不是别的速度？

回顾起来，数量问题的答案肯定是显而易见的。因为每个欧

约翰尼斯 · 开普勒

约翰尼斯 · 开普勒（见右图，一个年轻人），1571年12月27日出生于斯图加特附近魏尔市的一个中产阶级家庭。他上的是图宾根大学，打算进入仕途，但在1594年被提名出任格拉茨的数学教师。1600年初他应邀到布拉格拜访第谷，当年年末，在格拉茨受到宗教迫害之后，他回到布拉格成为第谷的助手，并于1601年成为第谷的接班人。从1612年起他生活在林茨，在那里他得到一个"地区数学家"的职位（是由上奥地利议会任命的——译者注），直至1626年由于受到军队围攻他被迫弃城而去。之后的四年中他居无定所，最后于1630年11月15日在雷根斯堡死于高烧。





几里德的学生都知道，正好有五个正多面体（四面体、六面体、八面体、十二面体和二十面体），不多也不少。因此，对于上帝这个几何学家来说，恰好有五个图形可用来隔开相邻的行星天球：五个图形，五个空间，因此有六个行星天球被这些空间分开。

一系列球随着正多面体变动的想法启发了他对行星到太阳距离的解释。一番创造性的处理之后，开普勒发现了一个特殊的系列，其中球的半径和哥白尼从对现实世界中行星的观察推导出来的距太阳的距离相当一致。

现在还有一个问题，即行星在轨道上的运行速度。哥白尼曾很满意地发现，行星离太阳越远，它旋转一周的时间越长。对哥白尼来说，这显示了宇宙在几何上的和谐。但是当开普勒确信，这种和谐是由中心的太阳的物理——这里就是动力学——影响而引起的，正如它使得行星在轨道上前进一样时，他就将天文学带上了一个全新的轨道。显然这种太阳力在远处是比较弱的，这就是为什么外行星旋转得比较慢的原因。

开普勒的物理直觉，由于认识到太阳比地球大（事实上是比所有的行星都大）而得到加强：因此巨大而有力的太阳应当居于体系中心。当下一代天文学家接受"力"这个概念作为理解天空的关键时，当太阳的巨大尺度逐渐被认识时，地心宇宙学（比如第谷的）存活的日子就屈指可数了。

开普勒写的《宇宙神秘》(Cosmographic Mystery，1596年)中的一幅图，他在其中揭示了上帝为行星安排的轨道之间的几何关系。每个轨道以一个球来表示，两个球之间以五种正多面体中的一种分隔开。最外层的球是土星，它内部以正六面体标记，在这个正六面体内部是木星天球，这样正六面体就确定了木星轨道半径相对于土星轨道半径的比例。同样地，正四面体确定了火星轨道半径相对于木星轨道半径的比例；等等。

开普勒看穿了上帝的心灵，揭示了上帝为宇宙选择的结构的几何运动。他为之自豪的著作《宇宙神秘》出版于1596年，当时他只有25岁。即使没有对于新物理学见解的暗示，作为第一本无可辩驳的日心学说著作，它也是有重要意义的：因为不可能有那么一系列的球体和正多面体，如此适合于以地球为中心的体系。

开普勒给第谷送去了一册他写的书。那时第谷正在考虑太阳和月亮运动的详细模型，但在行星方面没什么进展。第谷没有被开普勒书中的哥白尼主义态度所吓倒，他看出这是一部有着特殊数学天才的作品，因此他邀请开普勒到汶岛来访问。然而，丹麦的岛屿太遥远了，做这样一次访问绝非易事，开普勒还有别的事务。但很快新教徒在格拉茨的处境恶化了，当开普勒得知第谷已经离开了汶岛到了布拉格，于是他决定做一次试探性的拜访。

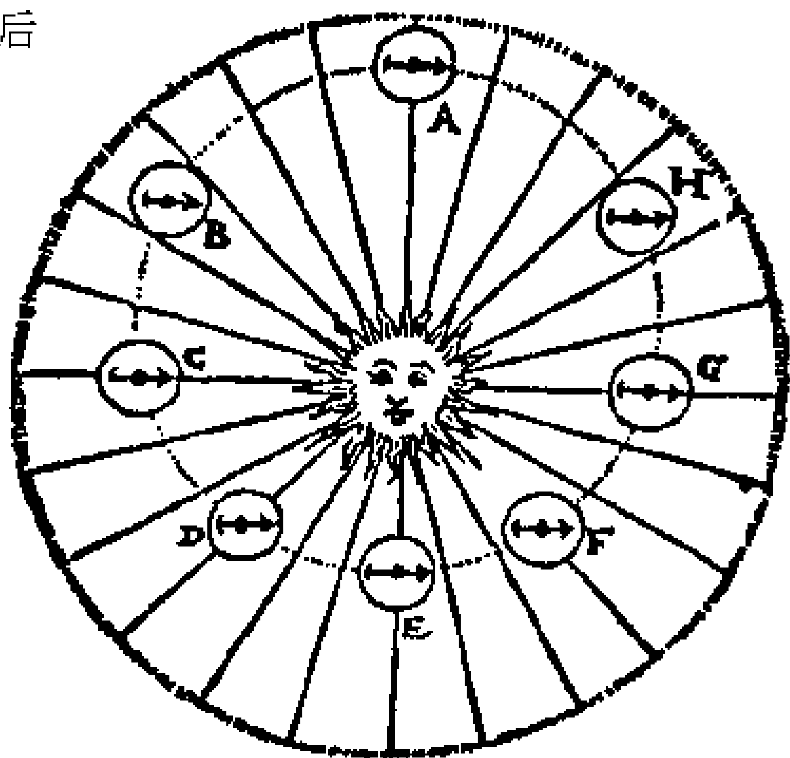
火星之战与《新天文学》

1600年2月开普勒到达第谷的天文台，在那里他对火星的轨道研究了三个月。除了离太阳最近因而难以观测的水星之外，火星是一颗轨道最不接近正圆的行星，所以根据传统的圆周运动来处理它是最困难的。三个月之后，开普勒回到了格拉茨，但是到了10月份，他又敲响了第谷的门。丹麦人很高兴地接纳了他，开普勒接着研究起了火星。一年后第谷病逝。在48小时之内，开普勒被委任为第谷的接班人。

开普勒的火星之战，也是对上帝之战，此战持续了好几年。他曾说，他的战役有三项基础：哥白尼的日心理论，第谷·布拉赫的无可比拟的观察记录，以及英国人威廉·吉尔伯特（William Gilbert，1544 － 1603年）的磁哲学。1600年，伦敦卓越的物理学家吉尔伯特出版了他的实验理论《磁学论》(On the Magnet)，在书中他认为地球是一个巨大的球形磁体。作用力——吉尔伯特用来解释物体为什么会落在地球表面上，为什么磁针指向北面，以及诸如此类的问题——启发开普勒设想太阳对行星的影响。开普勒相信，太阳自身是旋转着的，并不断向外传递一种感应以推动行星运动，近处的行星要比远处的行星受到更多的感应。行星的轨道在以太阳为中心的体系中不是正圆，因此开普勒也不得不给出一个力来改变行星到太阳的距离。从磁的概念出发，他猜想太阳是对行星轨道的一部分进行吸引，而对其余的则进行排斥。

这种物理直觉后来被证明是具有决定性的。例如，在关键的时刻，它导致开普勒认识到他必须将行星轨道与真实的、物理上的太阳联系起来；像他之前的哥白尼已经用行星轨道来替代了地球轨道的几何中心。更一般地，它使得开普勒将他的注意力集中到了由太阳之力造成的实际的行星轨道上，而他的前辈们则全神贯注于分立的几何结构——本轮等等——所生成的轨道上。因此，开普勒很满意有一个单独的模型能从黄经和黄纬两个维度生成行星的运动；比较起来，即使哥白尼也只能满足于从一个几何模型生成黄经运动，另一个（不相融洽的）模型生成黄纬运动。

他的物理直觉也被证明是一块绊脚石，最引人注意的是当他分析了火星运动之后转向轨道的精确形状问题时。他一度从考虑的选项中拒绝椭圆，尽管它们的几何学在古代阿波罗尼乌斯时期就已经完全被理解了：椭圆有两个对称轴，而动力学的考虑建议轨道将只有一个这样的轴。即使在今天，行星轨道——椭圆以太阳为其一个焦点——的奇异也使人吃惊，因为，它以短轴为几何对称，而从动力学上看太阳只在这个短轴的



开普勒关于太阳如何影响一颗行星的解释。行星的“磁力线”（以箭头表示）是这样的：其末端与太阳距离相等，太阳的作用就是推动行星沿它们的轨道旋转。当行星在轨道上运行时，“磁力线”保持它们的方向不变，因此，“太阳友好区”开始转向太阳，行星被太阳所吸引。如此持续下去，直到行星到达中心位置E点，此后遇到来自太阳的越来越强的抵制，直到它再一次到达A点。

一侧，而在另一侧则没有对称物体，是个“空”焦点。

对开普勒的研究来说同样具有决定性的是第谷的观测遗产，尽管开普勒的哥白尼立场在他和第谷的其他继承人打交道时造成了无数的外交问题。完整的观测记录对开普勒攻克火星问题是极为重要的。比如，有一个阶段开普勒认识到，任何基于地球的观测，都涉及到在一个运动平台上测量火星的位置，而这个平台在空间的位置是未确定的。但是，他能够利用第谷有关10次火星“冲”（此时地球在太阳和火星之间，三者成一直线）的观测记录来巧妙解决问题，因为此时地球上的观测者观看火星恰如一个假想的观测者在不动的太阳上观测火星一样。当他后来需要逆转这个过程、在火星轨道的某个确定位置“观测”地球时，他发现第谷留下的观测资料足以使之成为可能。
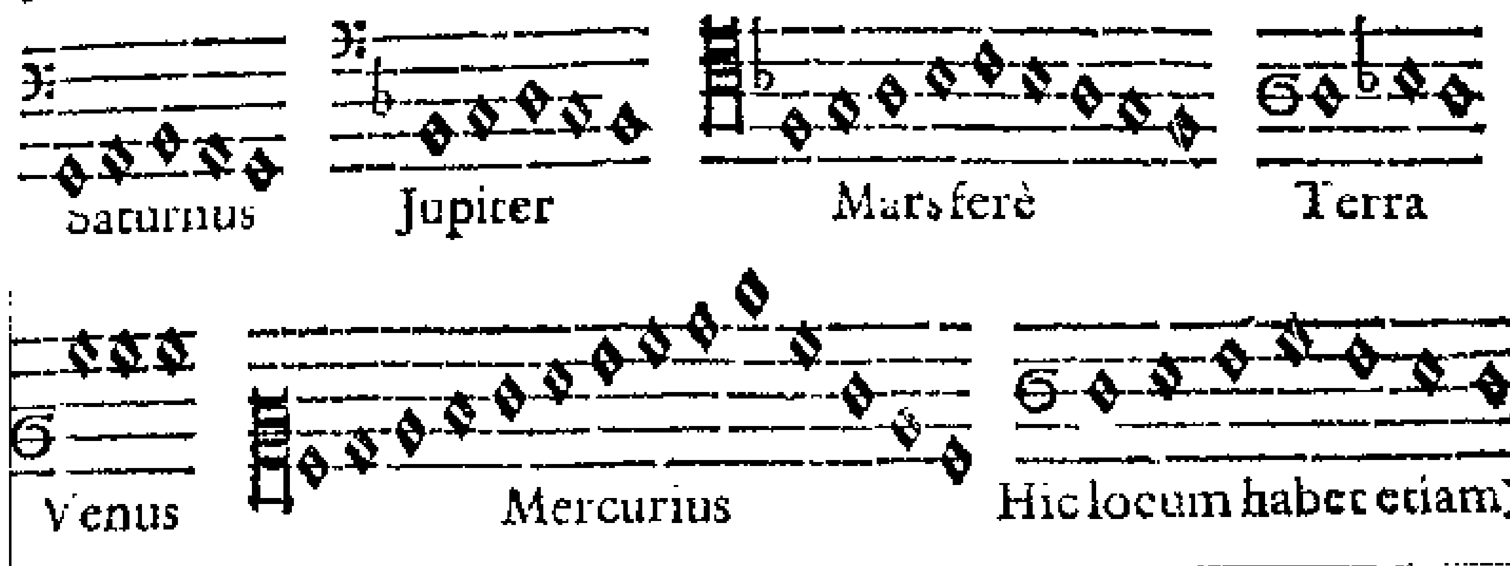
就如有幸拥有第谷的观测资料一样，第谷的观测精度刚好使开普勒得以发现行星运动的定律。一方面，它们的精度足以使得开普勒考虑非圆周轨道。开普勒已经能够用单个圆构成的模型生成火星的黄经运动；但是当他研究这个圆是否也能说明行星的黄纬运动时，他发现此间有8′的误差。这个误差对于任何一个第谷的前辈都是可以接受的，但是第谷观测的精确性高于8′，所以要作为一个理想的解决方法，圆就不得不被放弃了。

另一方面，在牛顿之后的世界里，我们知道，行星并不是严格按照以太阳为一个焦点的椭圆运动。即使没有其他行星的出现（它们的引力事实上会导致轨道的摄动），位于一颗行星自己轨道焦点上的也将不是太阳本身，而是太阳和该行星组成的系统的引力中心。如果第谷的观测能够再精确些，也许不仅是圆，甚至还有椭圆也一样会被排除掉。

开普勒的“第一定律”——行星的轨道是以太阳为其一个焦点的椭圆，出现在他描写的他的火星之战的著作当中。这一定律是一个非常精巧和简单的解决轨道问题的方案，它打破了统治天文学两千年的圆周运动的符咒。

他的“第二定律”（实际上产生于第一定律之前）是混乱的和令人迷惑的。开普勒首先假设了一个托勒密“对点”（见本书第38页）的变种，一个从那里观测起来行星运动是匀速的位置。这个位置后来被认识到就是椭圆轨道的“空”焦点。接着他求速度v和行星到太阳距离r的反比（v=1/r）。最后，他给出了我们今天知道的第二定律：行星与太阳的连线在相同的时间内扫过相同面积。这究竟是准确的还是近似的，对于另外一些天文学家来说它们远不是清楚明白的，因为单凭观测几乎无法区分它们。从动力学上来说，无论如何，区别是深刻的，并且这种情况只有到1687年，艾萨克·牛顿将运动——面积定律综合到统一的动力学上之后才变得清楚了。同时，当椭圆轨道被大多数人接受的时候，有关行星速度变化这个至关重要的问题依然令人困惑，为此，仍有很多人宁愿采用对点之类的形式来工作。

开普勒的《新天文学》(New Astronomy）出版于1609年，这是一本令人望而生畏的巨著，从概念上说，它在数学和作为基础的物理学两方面都是可疑的。它所表达的革命，显示在它的全名《新天文学：基于原因或天体的物理学，关于火星运动的有注释的论述》。开普勒发现了天文学是几何学的一个分支，而他又将它转变成了物理学的一个分支。


HARMONICIS LIB. V. 207

mnia (infinita in potentiâ) permeantes actu : id quod aliter à me non potuit exprimi, quam per continuam seriem Notarum intermedia-

在开普勒看来，“天体的运动无异于一些声音的连续演奏，它能被心智理解，但不能被耳朵听到。”在《宇宙和谐》中，他声称，能够建立由行星绕太阳运动及其速度与距离变化所生成的音符，需要的话，他可以把音符转换成五线谱；例如，他认为土星的音调将比木星的低得多。

宇宙和谐

在《新天文学》中，开普勒研究了单个行星绕日旋转的行为，但是他长期坚持的要理解上帝创造的全部结构的雄心，需要有关诸行星轨道之间关系的知识。这是他在《宇宙和谐》(The Harmony of the World) 中探索的众多课题之一。对宇宙和谐的研究可追溯到毕达哥拉斯（见本书第25页），他是凡人中惟一能够欣赏天球音乐的人。开普勒寻求在几何学和天文学的各个方面可以发现的算术比例中的和谐性，在该书第五卷中，他研究了行星在轨道上的加速和减速等问题，他相信能够从中得出天体音乐的真正音符。他也寻求能揭示行星轨道大小和周期数学模型；他不知何故发现了如下事实：行星周期的平方和其轨道半径的立方成固定比例（开普勒的“第三定律”）。哥白尼曾很高兴地发现，一个行星离太阳越远，它的旋转周期越长。开普勒现在找到了确证这个事实的数学规律。

当《宇宙和谐》在1619年问世时，开普勒正在《哥白尼天文学纲要》(Epitome of Copernican Astronomy) 中将他的想法和发现推向更多的听众。但由于他母亲因巫术受到审讯，他的工作被打断，直到战争的硝烟弥漫在他周围的时候，他的《哥白尼天文学纲要》才分别于1618年、1620年和1621年陆续出版。这实际上是他的最大的一部著作。该书以问答的形式，涵盖了他所有的天文学思想。第四卷是关于“天体的物理学”的，出版于1620年，从概念上说也是最重要的。主题涉及从超凡的几何学家对正多面体的应用，到不仅使得行星而且使得月亮按轨道运行的物理力。哥白尼的名字虽然出现在书名之中，但是开普勒只是展示了创造“天体的物理学”带来的革命，然后将他书中的力和哥白尼《天体运行论》中的几何本轮和均轮做了比较。在《哥白尼天文学纲要》中，当然没有像现代课本中那么直白的“开普勒三定律”，但是这本书最终使这些定律被广大读者所理解。

但是，开普勒天文学尚未面对传统的考验：它能够作为具有更高精确度的星表的基础吗？第谷参与到天文学中来的原因正是由于对基于哥白尼模型的《普鲁士星表》感到不满意。在1601年，当第谷将开普勒介绍给鲁道夫二世的时候，皇

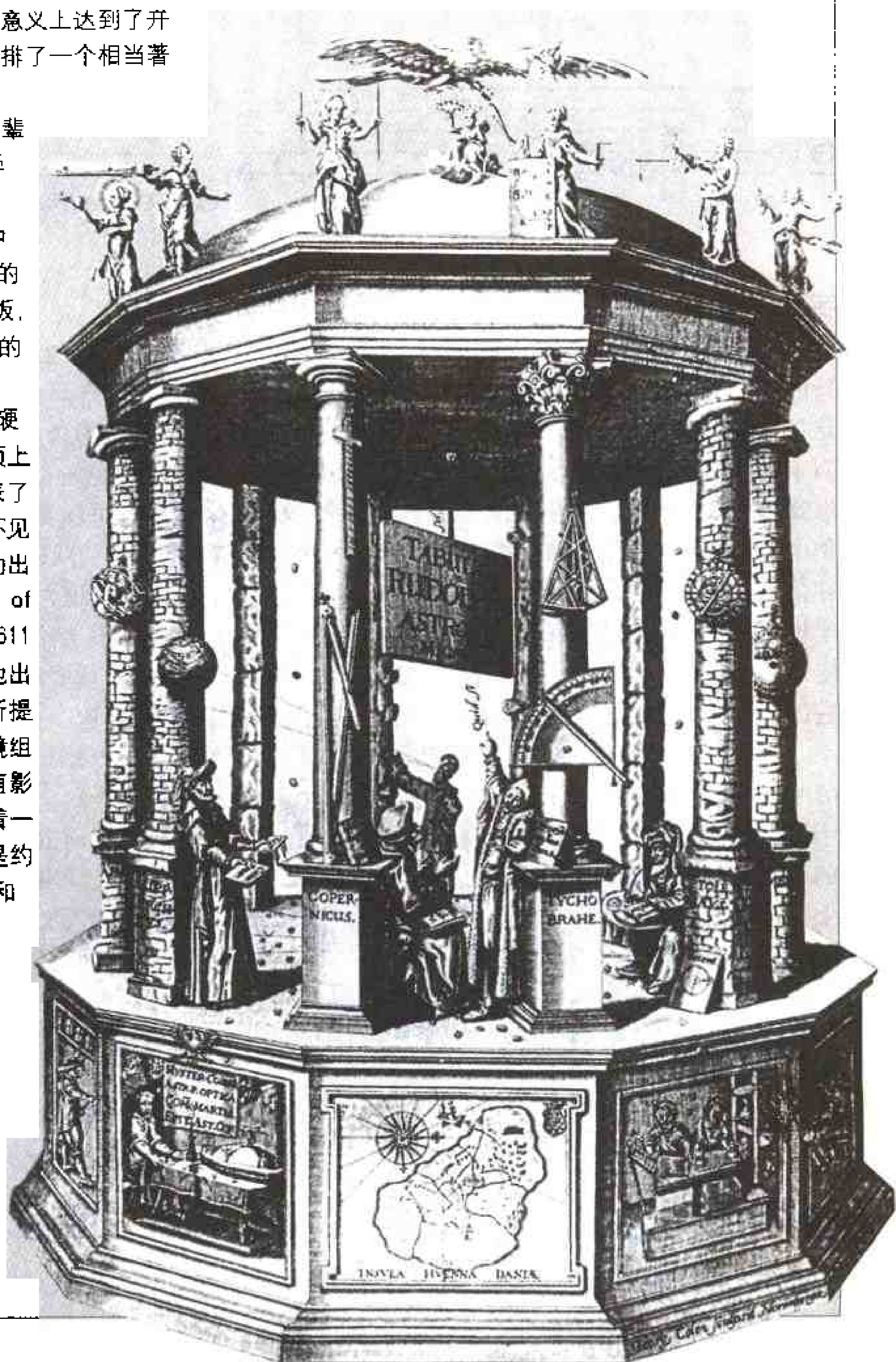
开普勒的天文学神殿

1601年皇帝鲁道夫二世委派开普勒和第谷一起计算行星位置表即《鲁道夫星表》。这个星表到1627年才完成，那时第谷和鲁道夫都已经去世很久了，开普勒的生命也只剩下三年时间了。行星理论的传统目的，是产生精确的星表。《鲁道夫星表》正是在这个意义上达到了开普勒一生工作的顶峰。开普勒为星表安排了一个相当著名的卷首插图。

在天文学神殿中的是开普勒的前辈们。在左端和右端是古代伟大的天文学家希帕恰斯和托勒密。中间的是哥白尼，他鼓励开普勒将太阳置于行星体系的中心；以及第谷，他的精确观测为开普勒的理论提供了事实基础。第谷正指向天花板，那里表示了他的行星体系。一个传说中的星占学家站在他们后边。

在神殿的最上面吊着一枚特大的硬币，象征着皇帝提供的财政资助。在顶上环绕站立的是六位女神，她们分别代表了开普勒工作的六个方面（其他我们看不见的则在序诗中被提到了）。1604年开普勒出版了《天文光学》(The Optical Part of Astronomy)，讨论了折射之类的问题；1611年，为了响应伽利略望远镜的发明，他出版了《折光学》(Dioptrics)，用几何分析提出了一个将成为天文望远镜标准的透镜组合。因此，左端的物理女神，拿着一个有影子的球，紧挨着她的是光学女神，拿着一个望远镜。下一个女神表示对数，对数是约翰·纳皮尔（John Napier）在1614年和1619年出版的书中提出并阐述的；而开普勒的《千位对数表》(Thousand Logarithms）出版于1624年。其余的女神拿着交食表的一对不相等的手臂象征着面积法则；磁铁则是开普勒确信的那个控制行星轨道的太阳力的象征。

在神殿的底部，我们看到左边的一个图形是开普勒自己，他正焚膏继晷地工作着，旁边是他四本书的名字。正中间的一个图形是汶岛的地图，那是第谷进行观测的一个丹麦岛屿。



帝就已经给他分派了任务——和第谷一道制作由第谷设计好的新的行星表。这个行星表将叫做《鲁道夫星表》(Rudolphine Tables)。

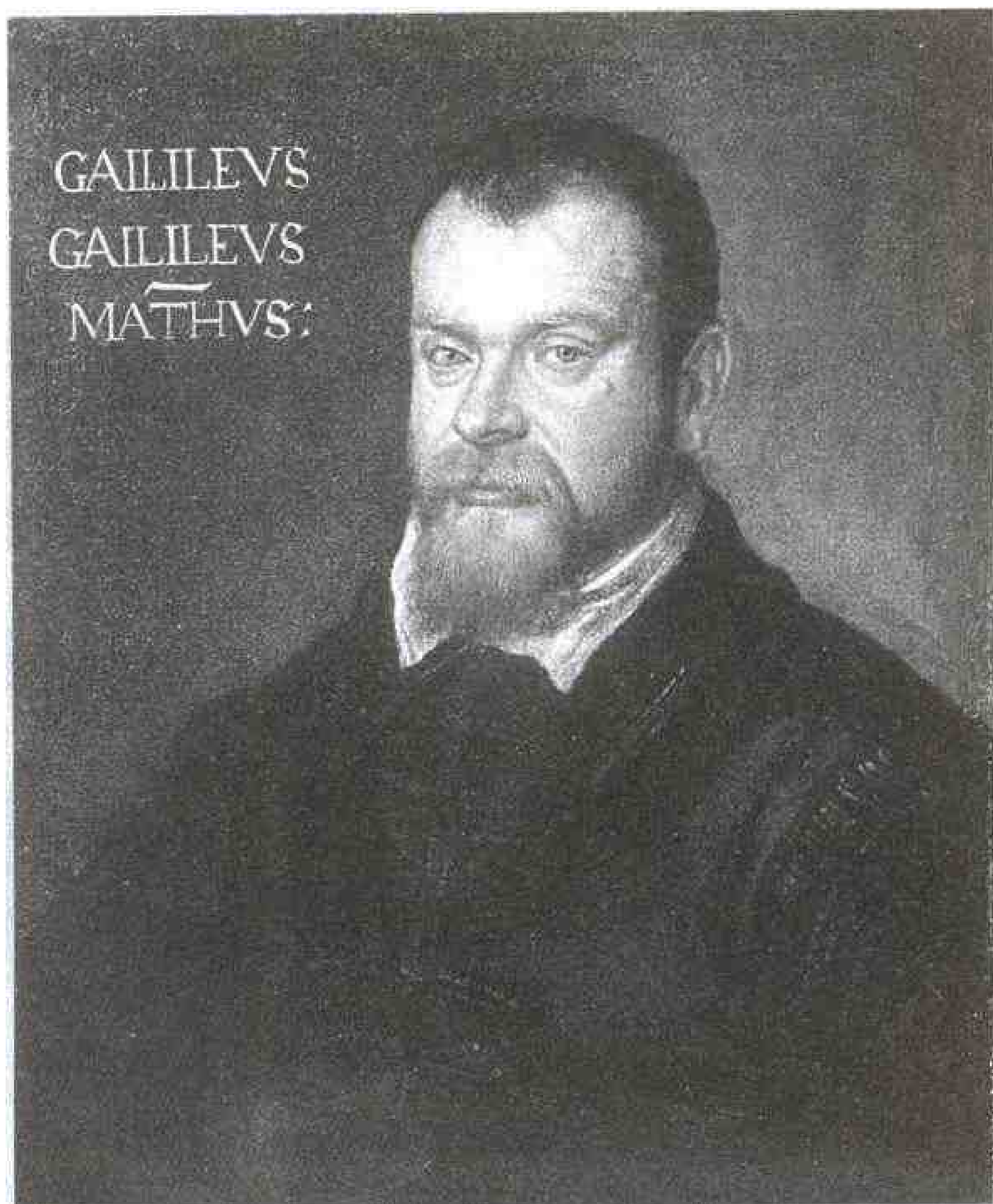
这个星表最终出现在1627年，它的精确性在四年后惊人地显示出来。1631年11月7日，此时开普勒去世已一年，法国天文学家皮埃尔·卡西尼(Pierre Gassendi)成为历史上首次观测到水星凌日(水星在地球和太阳之间穿过，在日面上造成移动的黑点——译者注)的人，这正如开普勒预测的一样。开普勒星表的错误仅仅在于误将太阳的半径计算成了实际长度的三分之一，但是被该表取代的哥白尼星表，则在数量上错了30倍。如果开普勒星表是非常精确的，那么基于这个星表的行星定律将是值得认真考虑的。

伽利略装置望远镜支持哥白尼

哥白尼明显地没有能够改善他自己的宇宙理论；由于后面各卷主要是数学，使得他在《天体运行论》卷一中关于宇宙的简要介绍的观点显得模糊不清。无疑，

伽利略·伽利莱

这里画的是伽利略四十出头的时候。伽利略于1564年2月15日出生于比萨，他是一个音乐家的儿子。他在比萨大学学习过医学，随后很快就转学了数学，成为比萨的数学教授。从1592年起他又到了帕多瓦任数学教授，他一直在那里任教了18年。1610年他放弃了教职，因为他用新近发明的望远镜所作出的发现，获得了托斯卡纳大公的有声望的数学家和哲学家的职位，他拥有这个职位直到1642年1月去世。使用望远镜的新发现使他成了好战的哥白尼主义者，而这在1614年给了他的敌人一个通过煽动宗教诽谤反击他的机会。这个问题在1632年随着《关于两大世界体系的对话》(Dialogue on the Two Great World-Systems)的出版而被再次提出，并且是以更严重的形式——伽利略遭到软禁直到去世。



在16世纪末，公开相信哥白尼的人还很少。但这些人中不包括被证明是哥白尼学说最有效的倡导者的伽利略·伽利莱（Galileo Galilei，1564－1642年）。

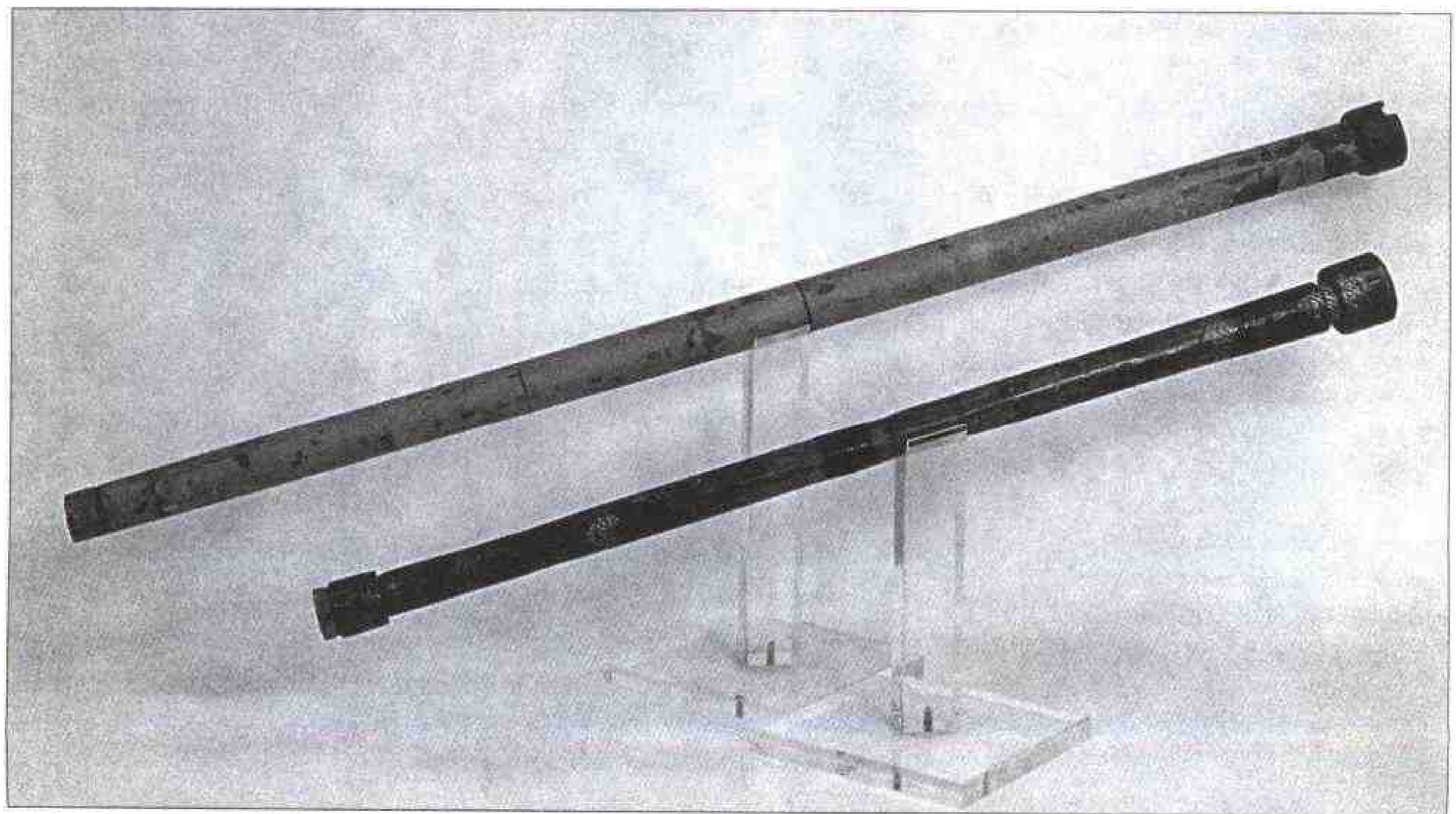
伽利略在佛罗伦萨上中学，1581年成为比萨大学酷爱医学的一个学生。四年之后他回到了佛罗伦萨，在那里自学和教授数学。1589年他成了比萨的数学教授，1592年他得到了收入更高的帕多瓦数学教授的职位。在帕多瓦，他用地球的周日和周年运动，对令人迷惑的潮汐现象做了一个可能的解释；当1597年开普勒送给他一本《宇宙神秘》的时候，他在回信中暗示了他的这个理论。但是由于他还没有深信哥白尼主义，开普勒呼吁的道义上的支持没有立即得到回应。伽利略在1609－1610年间用望远镜得出的发现，消除了他其余的疑问。

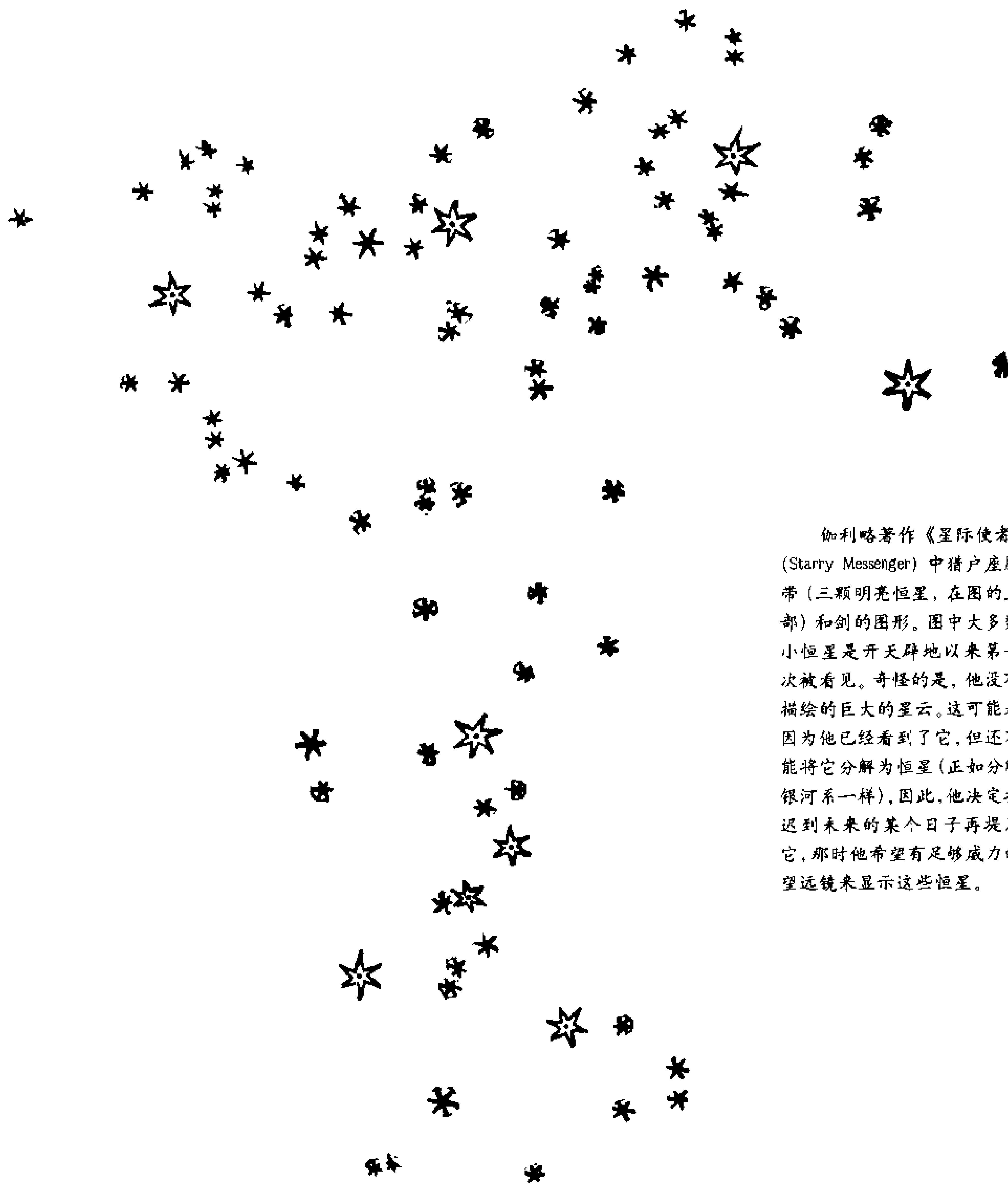
人类感官的扩展

除了特别的事件比如新星出现之外，一个典型的文艺复兴时期的天文学家看到的宇宙，和古代先辈们看到的并无不同。如果这位文艺复兴时期的天文学家在天文学上有较好的机会，这将主要是因为他有了更多机会学习前人和同行们印刷的书籍，或是他们编辑的观测记录：他的优势是可以多读一些书，而不是可以多观测到什么天象。

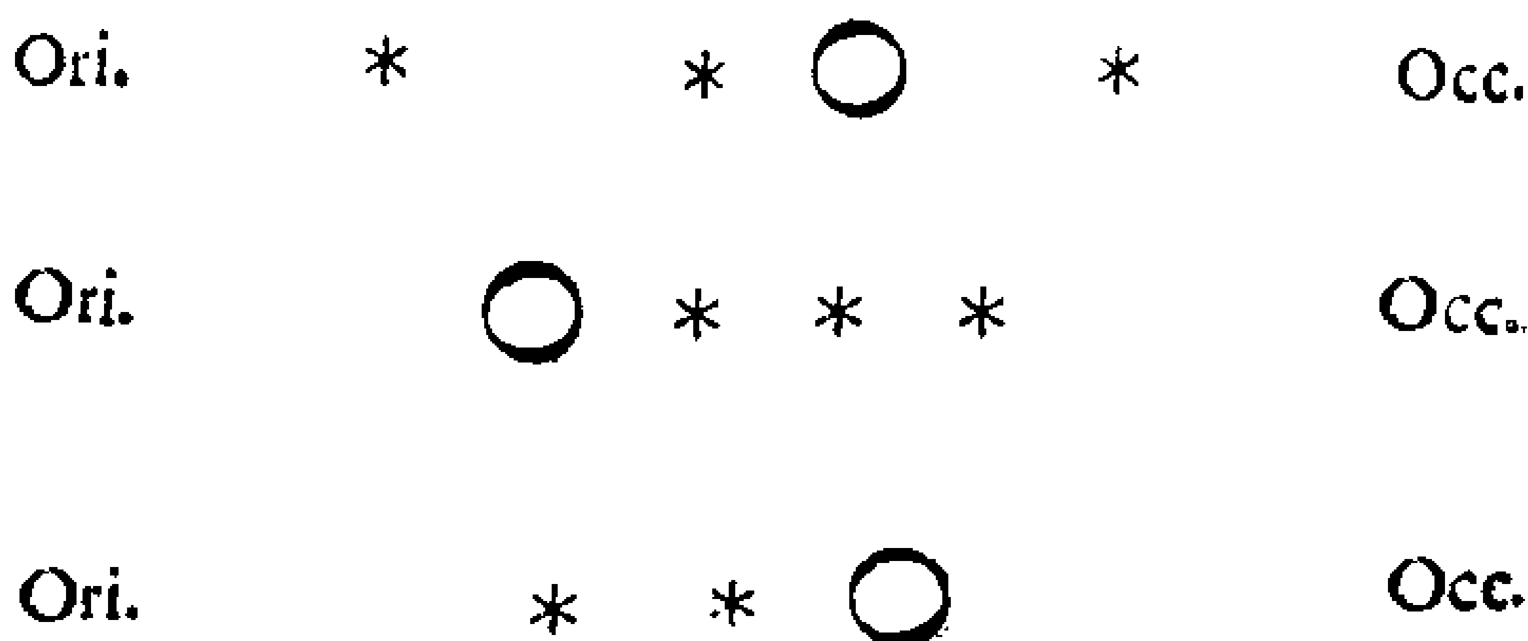
两个伽利略的望远镜，现藏佛罗伦萨博物馆。1611年3月伽利略前往罗马展示了他的发明，菲德利哥·凯西(Federico Cesi)王子为了表彰他的这个发明举行了宴会。晚餐之前，客人们用一架望远镜观看了一英里之外的题字，晚餐后他们又用它观察了木星和它的卫星。

但所有这一切都因一件事而发生改变。从现在开始，每一代的天文学家都将比他们的前辈拥有巨大的优势，无论他们的前辈们是如何辉煌。这是因为先进的仪器可以使得他们看到迄今没有看到的、不知道的、未被研究过的东西。他们将有能力说他们的前辈——正如伽利略说的——“如果他们看到了我们所看到的，他们也将做出我们所做出的判断。”





伽利略著作《星际使者》(Starry Messenger) 中猎户座腰带（三颗明亮恒星，在图的上部）和剑的图形。图中大多数小恒星是开天辟地以来第一次被看见。奇怪的是，他没有描绘的巨大的星云。这可能是因为他已经看到了它，但还不能将它分解为恒星（正如分解银河系一样），因此，他决定推迟到未来的某个日子再提及它，那时他希望有足够威力的望远镜来显示这些恒星。



《星际使者》中对木星卫星的观察，最上边的图形显示的是1610年7月份的木星，它位于三颗小星之间，行星接下来向西（向右）运动，在图形的中部我们看在2月8日出现的被假设为恒星的三颗小星，此时木星在东面（左边），这和伽利略期望的正好相反，下部的图形显示了它们1月10日的结构，伽利略的小册子中几乎有一半篇幅是对这些卫星的观测。

1609年夏天，伽利略在威尼斯，他听到一个消息，说在荷兰有一种由一个圆筒和两片有曲面的玻璃片构成的仪器，能将很远的东西看得很清楚。曲面的玻璃象弯曲的镜子，众所周知可以导致变形，和真实情况大不一样。这样看起来利用两片有曲面的玻璃片构成的组合，仍然可以导致很大的变形，因此伽利略决定非常仔细地去验证这个传闻的真实性。他尝试为自己制造一个这样的仪器。

一个人对伽利略的仪器进行机械性的即席操作几乎没有什么困难。同年8月他再次到威尼斯，这次他给掌权者展示了可以放大八倍的望远镜，使得他们"感到非常惊讶"，他在帕多瓦的薪水因此得到了很大的提升。而在下一年，托斯卡纳大公科斯莫·美第奇（Cosimo II de Medici）给了他更好的职位；于是他于1610年9月回到了佛罗伦萨，这次是作为大公的终生数学家和哲学家到任的。

来自恒星的新消息

到1609年快结束的时候，伽利略已经将望远镜的放大倍数扩大到了20倍。当它用这些仪器观看恒星时，他看到了许多肉眼无法看到的恒星——开天辟地以来一直未被人类看到，直等到伽利略来发现的一些恒星。神秘的银河系，现在已被他解释为是由无数恒星所组成，两千年前亚里士多德的思索因此而被证实了。他还发现，尽管行星的视圆面可以按望远镜的放大倍数而扩大，但它对于恒星就不行了。这对于哥白尼主义者来说是个好消息。第谷（见本书第103页）已经估计过，为了解释探测恒星周年视差的失败，哥白尼主义者将不得不把恒星放置到700倍于土星距离以外的地方，并且为了在如此遥远处还能呈现出视圆面，这些恒星必须是非常巨大的。不过，现在已经知道这些恒星的视圆面只不过是一种错觉。

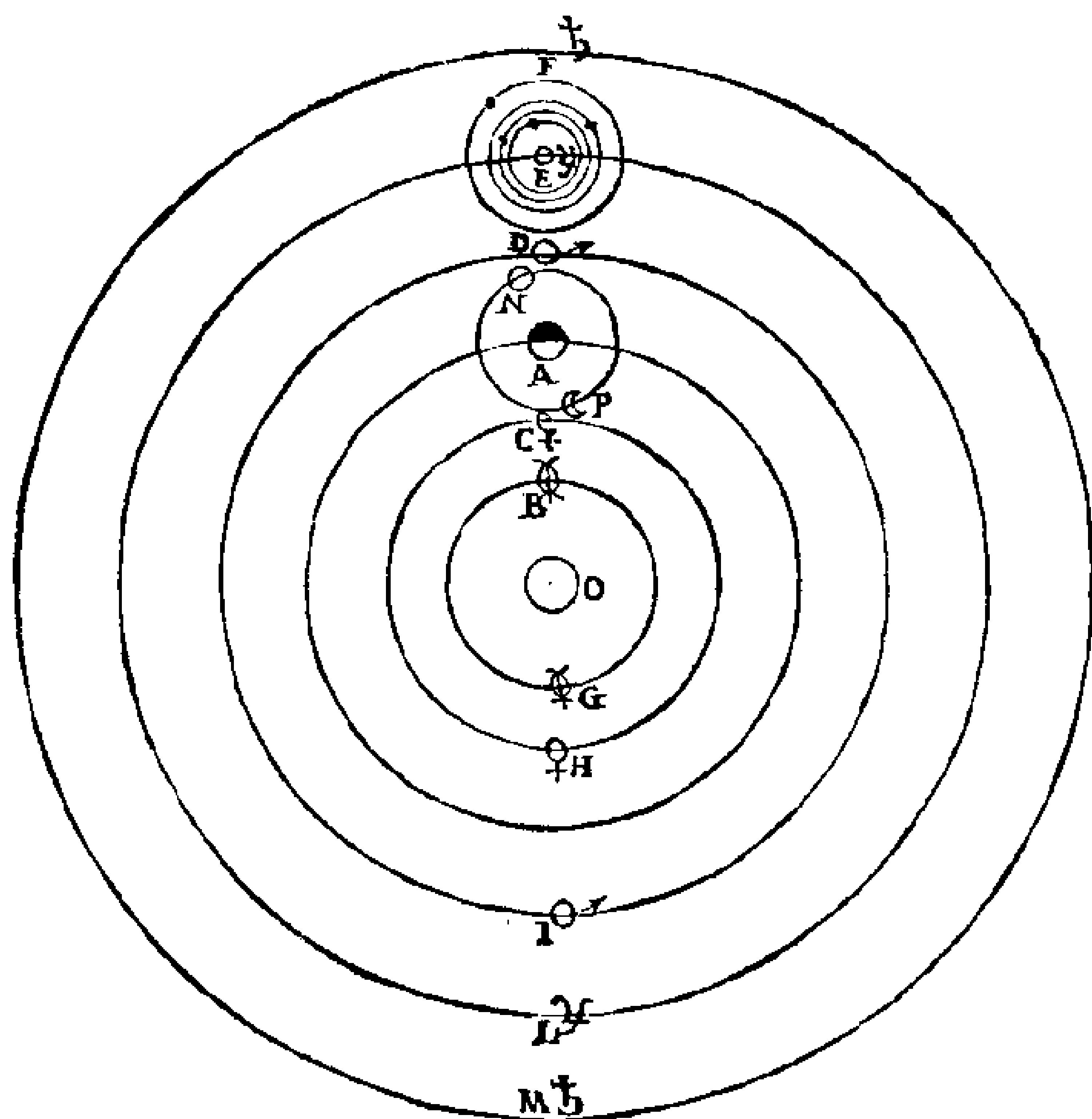
他在行星方面最惊人的发现是关于木星的。当他在1610年1月7日第一次观测木星时，他发现木星位于三颗小星的中间，而这三颗小星令人惊奇地排成一条直线。木星那时正向西（逆行）运动，因此，伽利略希望在这之后的夜里，木星将在这些假设的小星的西面。但事实上它却出现在了小星的东面。第二晚是多云天气，但是到了1月10日，他发现木星到了两颗小星的西面，而第三颗小星不见了。到1月13日，小星的数量变成了四颗，到1月15日，伽利略意识到所谓的恒星实际上是卫星，是绕木星旋转的、像被太阳带动的行星一样被行星带动的卫星。

这对于哥白尼主义者是个非常好的消息。早在《天体运行论》（见本书第88页）卷一给出的哥白尼体系模型中就有一个严重的不规则现象，即地球一方面是一颗普通的行星，另一方面是惟一一颗带有一颗卫星——月亮——而绕太阳旋转的行星。现在，望远镜揭示了还有另外的带着至少四个卫星的行星的存在。

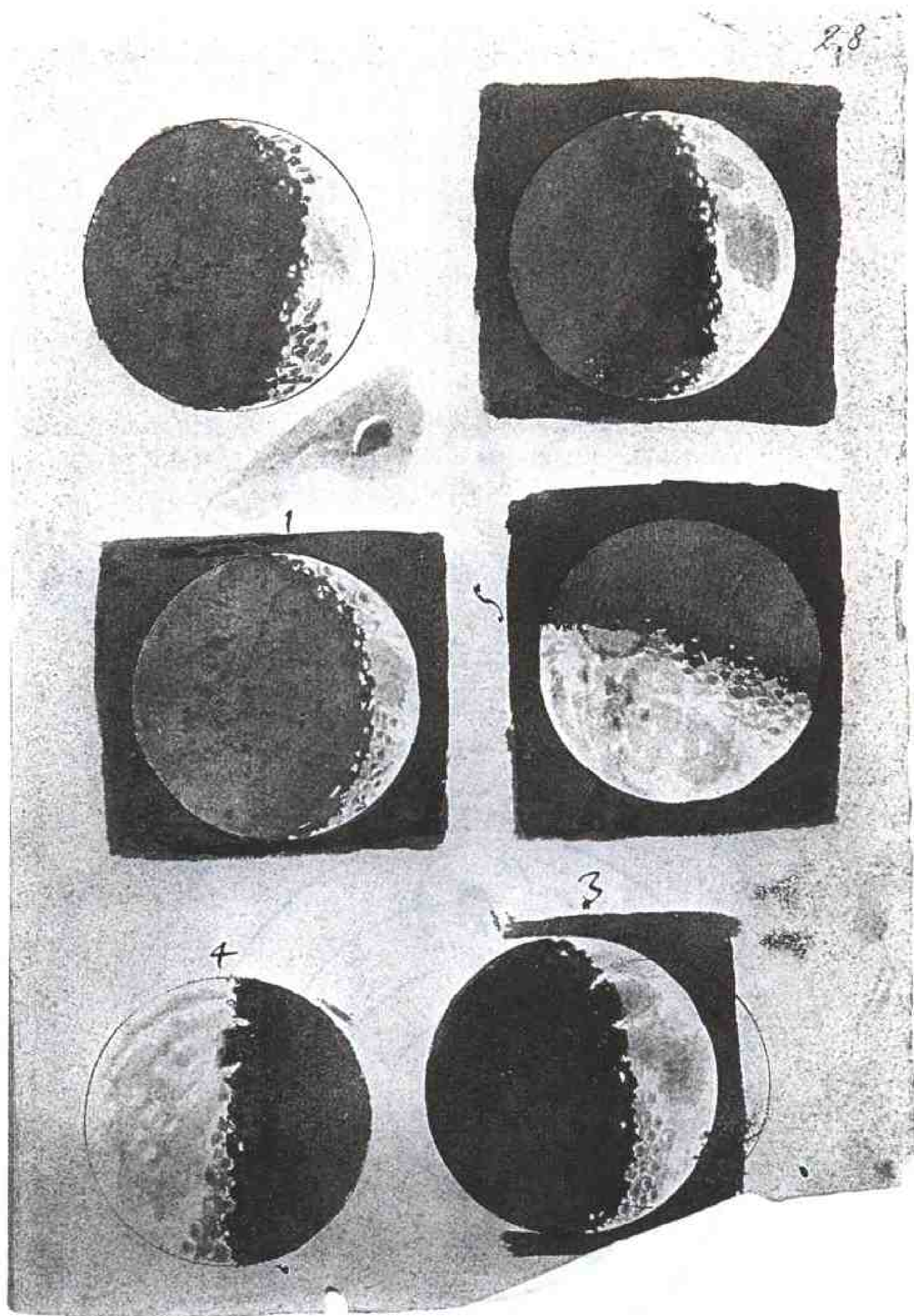
尽管这些发现被哥白尼主义者所欢迎，但却远不是那些选择了第谷体系或其他流行的妥协体系的人们所欢迎的。在这些体系中，太阳以地球为中心旋转，木星绕太阳旋转。但是现在教皇不得不——难以置信地——进一步扩展这种状况，将绕木星旋转的卫星也包含进去（见本书第124页）。

我们自己的月亮必定在伽利略用他早期仪器观测过的天体之列，但是现在到了严格检验的时候了。尽管外观并非白璧无瑕，但月亮被列入在亚里斯多德的天界之中，并且同属于完美的天体。然而伽利略的望远镜显示，它的表面是不规则的，和地球一样也有山峰——这些山峰的真实性，可以连同伽利略对它们实际高度的估算，让读者带回家去，以至于读者可以想象着试图去攀登它们。

伽利略很快就将他的新发现付印了，任何尚存的对日心体系真理的怀疑，都被他的观测排除了。他急于利用他的发现来促进他的事业。他在几个星期里就完



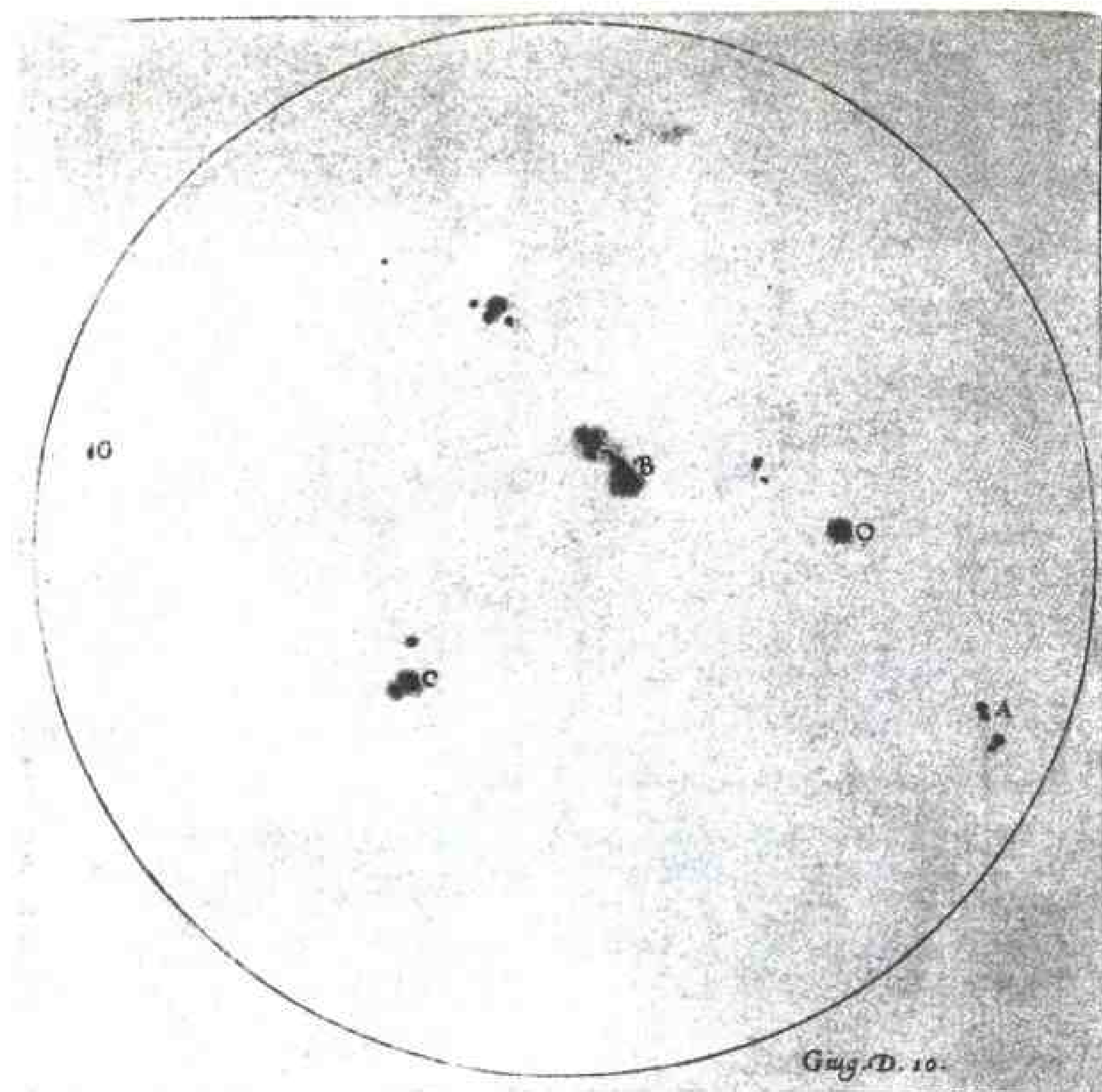
伽利略在他的《关于两大世界体系的对话》（1632年）中给出的哥白尼体系的大纲。它和哥白尼的图是一样的（见本书第89页），重要的区别是地球不再是惟一有卫星的行星。伽利略并没有试图表示出土星的两个神秘附加物。这两个神秘附加物在1610年被发现之后消失了两年，之后又出现了几个月（现在人们已经知道，这两个神秘附加物实际上是土星环——译者注）。



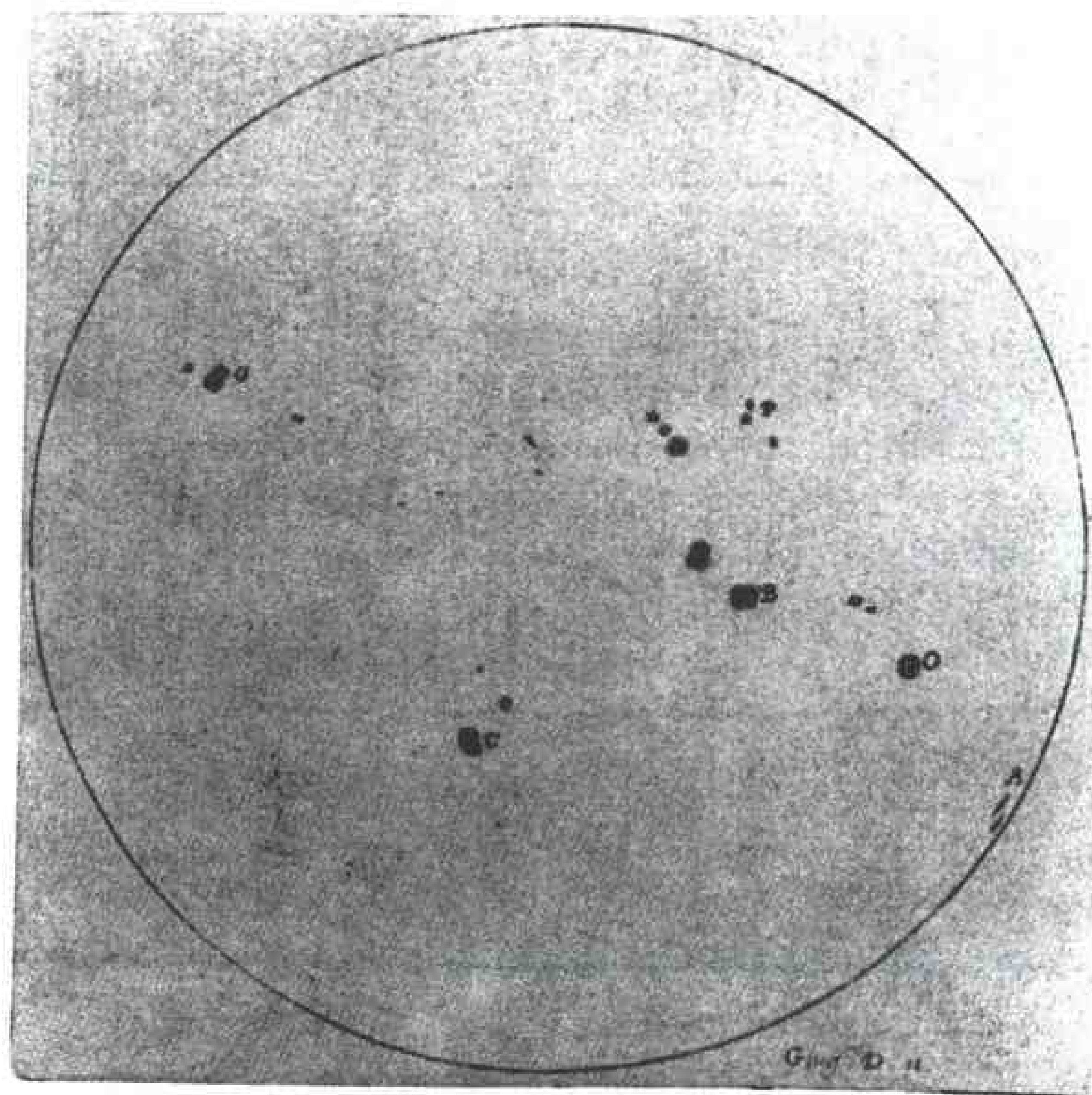
1609/1610年冬季伽利略画的月亮图形，可能是1609年11月30到12月18日期间。他得出结论认为"月球表面并非光滑的、平坦的，它不是完美的球形"，并非同亚里士多德的宇宙天体那样，"恰恰相反，它是不平整的、粗糙的，到处布满洞穴和突起，就像地球表面一样"。

成了《星际使者》的写作，宣布了他的令人震惊的消息。

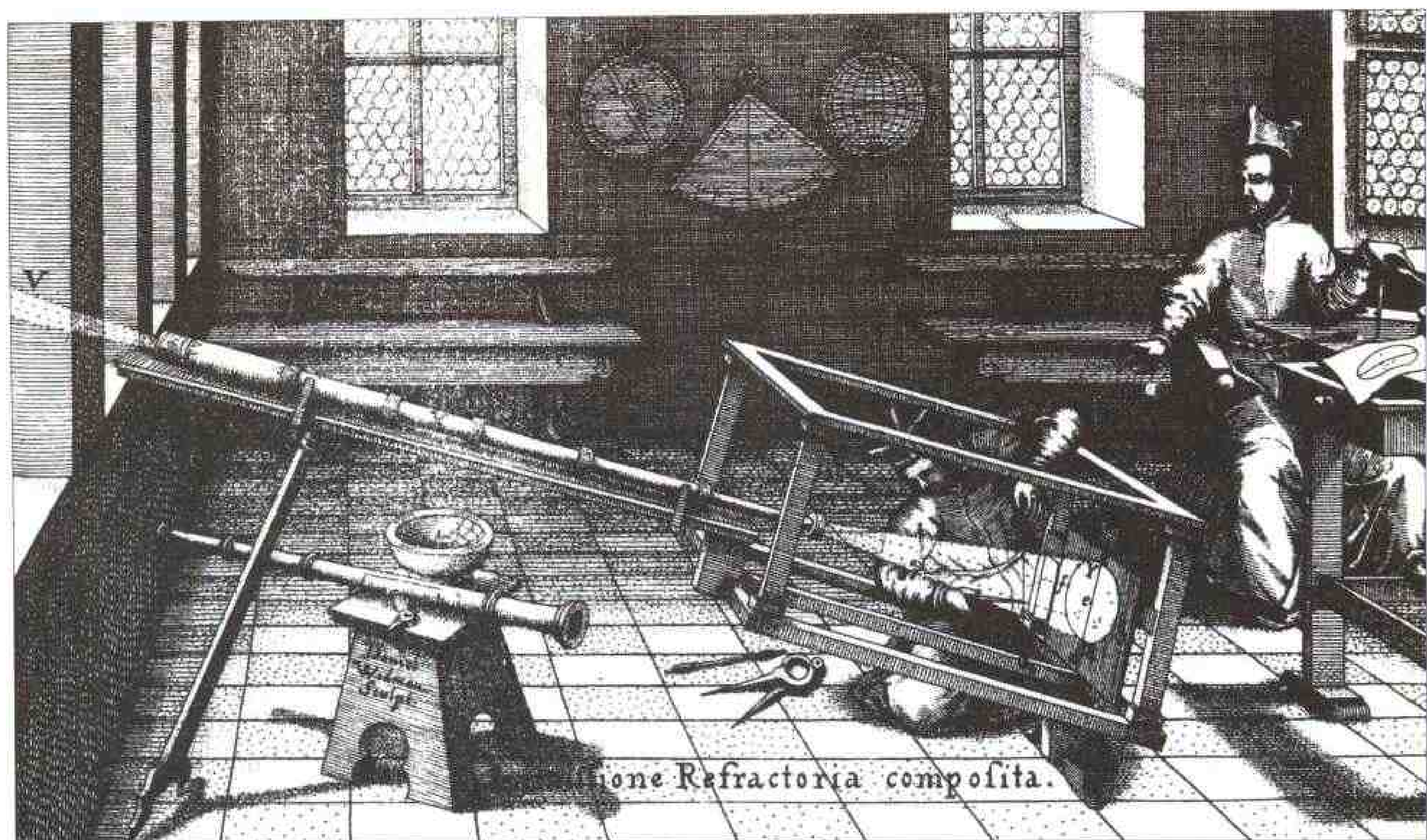
很多事情是难以置信的。很多人声称，通过有两个有曲面的玻璃片构成的管子不可能窥破宇宙的奥秘。但是决定性的支持来自一年以后，四位耶稣会天文学家在罗马签署了一份声明，确证了伽利略的发现。无论如何，这仅是在望远镜得



伽利略的《太阳黑子通信》(Letters on Sunspots) 中1612年6月10日的太阳黑子图形。在适当的情况下，太阳黑子是可以用肉眼看见的。第一个利用望远镜对太阳黑子的观测，是1610年下半年由英格兰的托马斯·哈里奥特(Thomas Harriot，约1560—1621年)做出的。1613年春天，大约是伽利略正在向罗马的观测者展示太阳黑子的时候，弗里西亚（即今荷兰）天文学家大卫·法布里修斯（David Fabricius）和他的儿子约翰（Johann）发现了它们，然后对它们进行了持续观测。6月，约翰完成了一本小册子，指出这些黑子是在太阳上的，因此它们是在转动着的。



伽利略所绘1612年6月11日太阳黑子的图形。1612年，伽利略——此时他还未发表过关于这个课题的东西——收到一本德语的小册子，小册子的作者是德国耶稣会士克利斯多弗·沙伊纳（Christoph Scheiner，1573—1650年）。沙伊纳第一次观测到太阳黑子是在1611年，他相信这些黑子是太阳的卫星，而不是在太阳自身上面的。由此发生的争论——因争论优先权而活泼生动——促使伽利略写成了《太阳黑子通信》。像法布里修斯一样，他在书中也认为这些黑子是在转动着的太阳上的。



克利斯多弗·沙伊纳和耶稣会同事正在用开普勒望远镜（见本书第132页）测量太阳黑子的位置。1611年，沙伊纳的持怀疑态度的宗教上司认为他关于太阳黑子的发现是如此难以置信，以致如果公布的话一定会为耶稣会招致嘲笑，因此一开始他被要求匿名发表。和伽利略不同的是，沙伊纳对太阳黑子的研究持续了很多年，集中体现他的研究成果的，是1626—1630年间出版的巨著《乌耳西内之玫瑰花》（Rosa ursina，玫瑰花是太阳的象征，而沙伊纳的赞助人是乌耳西内公爵——译者注）。画中的墙上挂着一个星盘，它是过去年代的纪念物。

到广泛使用之前才会有的事。到望远镜被广泛使用时，伽利略宣布的发现可以由任何一个心存怀疑的人对其进行检验。

在前几个月里，伽利略给出了三个进一步的发现。他发现，在传统宇宙理论中作为完美象征的太阳，其表面实际上是“斑斑点点、不洁净的”（尽管有人认为看到的黑子实际上是太阳的卫星）。土星看起来有神秘的附加物。这些附加物后来消失了，然后又回来了，这一直困惑着观察者。直到伽利略去世后很久，在1656年才由荷兰的物理学家惠更斯（Christiaan Huygens，1629－1695年）给出了一个奇特的解释：这颗行星“由一条薄薄的、与行星自身毫无接触的平面圆环环绕着”。具有更直接的重要性的，是金星有着与月相一样的位相，有时呈现满月那样的圆面，有时则如一弯新月那样。

这是完全不能与托勒密关于金星的几何学兼容的。在托勒密的模型（见本书第41页）中，金星总是在地球和太阳之间，因此金星被太阳照亮的一般总是背着地球上观察者的那一面，地球上的观测者永远不可能见到它的满月样的圆面。

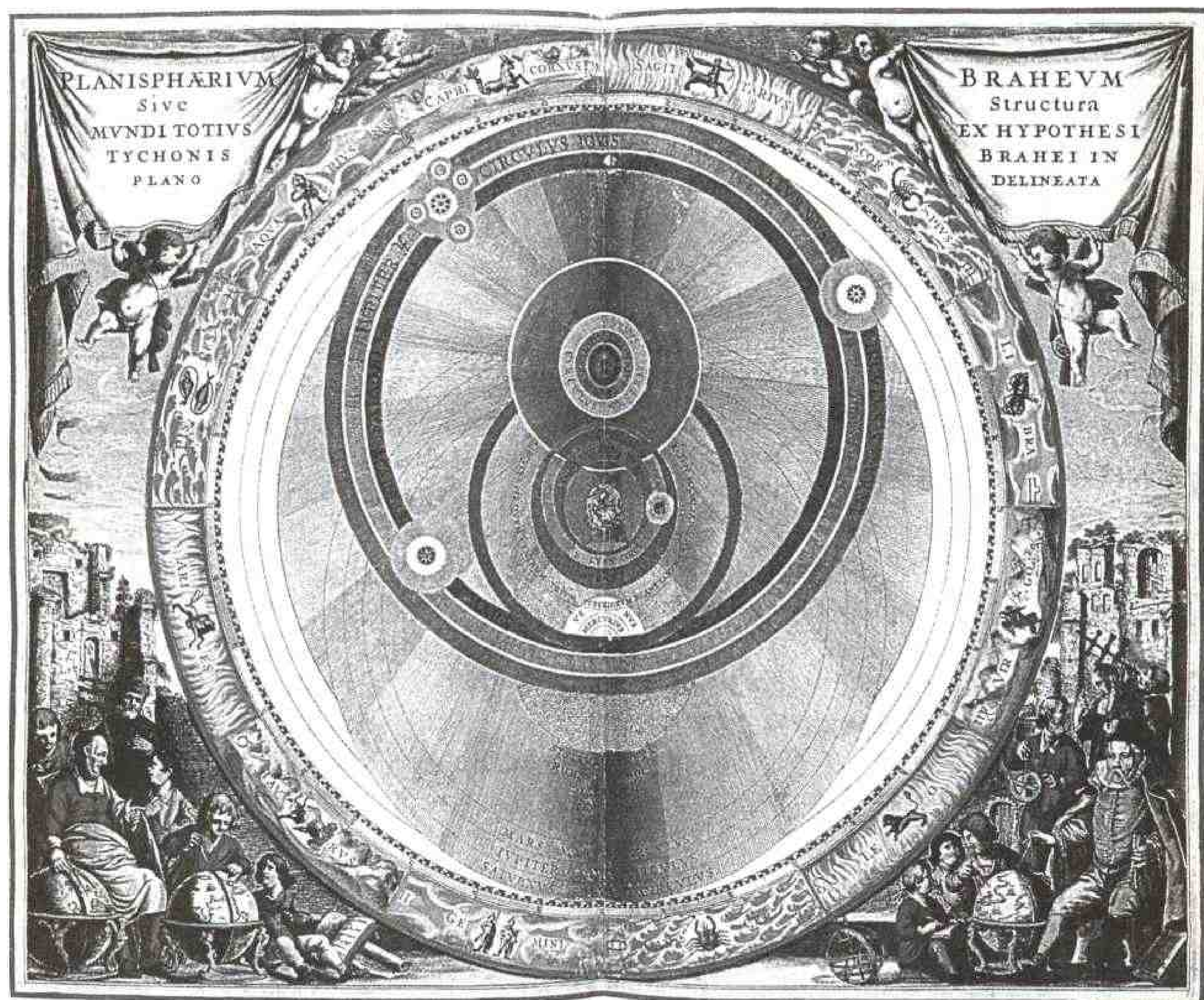
不幸的是，伽利略的发现，如果要作为哥白尼学说的证词的话，则金星位相告诉我们的仅仅是地球、太阳和金星的相对运动，并不能决定它们之中哪一个是静止的。因为这样的相对运动，在以太阳为中心的哥白尼学说中和以地球为中心的第谷体系中是一样的，观察到的金星位相，并不足以在它们之间做出选择。伽利略对于这些逻辑细节没有耐心。对他来说，第谷体系是庸俗华丽的妥协，不值得认真考虑；托勒密是错误的。因此哥白尼一定是正确的，其它的体系在判断上缺少理由。

哥白尼学说的宣传员

在《星际使者》和《关于两大世界体系的对话》两书中，伽利略都很小心地使他对哥白尼的支持显得不那么刺耳。赞助有如对待画家和诗人一样，对于天文学家和大学之外的数学家也是非常重要的。伽利略通过命名木星的卫星为“美第奇星”已经冒了一次有计划的危险了，如果这些卫星被证明是错觉该怎么办呢？但在私下里伽利略从不掩饰自己是个哥白尼主义者。并且，如果说他有交友的才能，同样他也有树敌的才能。在紧张的宗教改革高潮的后期，他的敌人终于找到一个机会，指控他否认圣经的真理——认为太阳是静止的。

1614年12月，当他遭到来自一个佛罗伦萨教坛的谴责时，事情就公开化了。那天诵读的经文来自《旧约·约书亚记》。约书亚命令太阳站住不动——这意味着动的是别的。“加利利人哪”，传教士借用了《新约·使徒行传》中的双关语，“你

第谷的行星体系，在1660年的版本中融合了伽利略关于木星的四颗卫星的发现。地球在中心，月亮在它的右边。地球上面是太阳，它被水星和金星轨道所围绕，再外面是火星、木星和土星。对于太阳和它的侍从卫星的一个可供选择的位置是在画的下半部。坐在画面底部右侧的是第谷，他正在测量一个天球仪。



们为什么站着望天呢”？

伽利略以在神学上的冒险作出了反应。在公开的《致大公夫人克里斯蒂娜的信》（Letter to the Grand Duchess Christina）（1615年）中，他回忆了以通俗语言写成的、充满宽容精神的传统天主教的教义，并争辩说：《圣经》的宗旨在于告诉人们如何去天堂，而不是告诉人们天堂如何运行。但是他的敌人继续他们的煽动，直到最后罗马的宗教法庭也卷了进来。这里的关键人物是耶稣会红衣主教罗伯特·白拉明（Robert Bellarmine，1542–1621年），一位圣洁的和有学者气质的人，他准备根据新的发现来重新解释《圣经》——但只当新的发现没有什么问题的时候。在哥白尼《天体运行论》的引言（它实际上是未经作者同意，而由校样阅读者插入的，见本书第86页）中，白拉明发现甚至波兰的教会法规已经——或看起来好像是——采取了传统的观点：天文学家的工作是精确地预测，而不是寻求宇宙学的真理。

事情的结果，到1616年被告知宗教法庭的各个部门，《天体运行论》将被停止传播，直到它被修正到与天文学文献的传统角色一致为止。白拉明私下里告诉伽利略，他不可以再相信哥白尼体系是真实的或为其辩护。

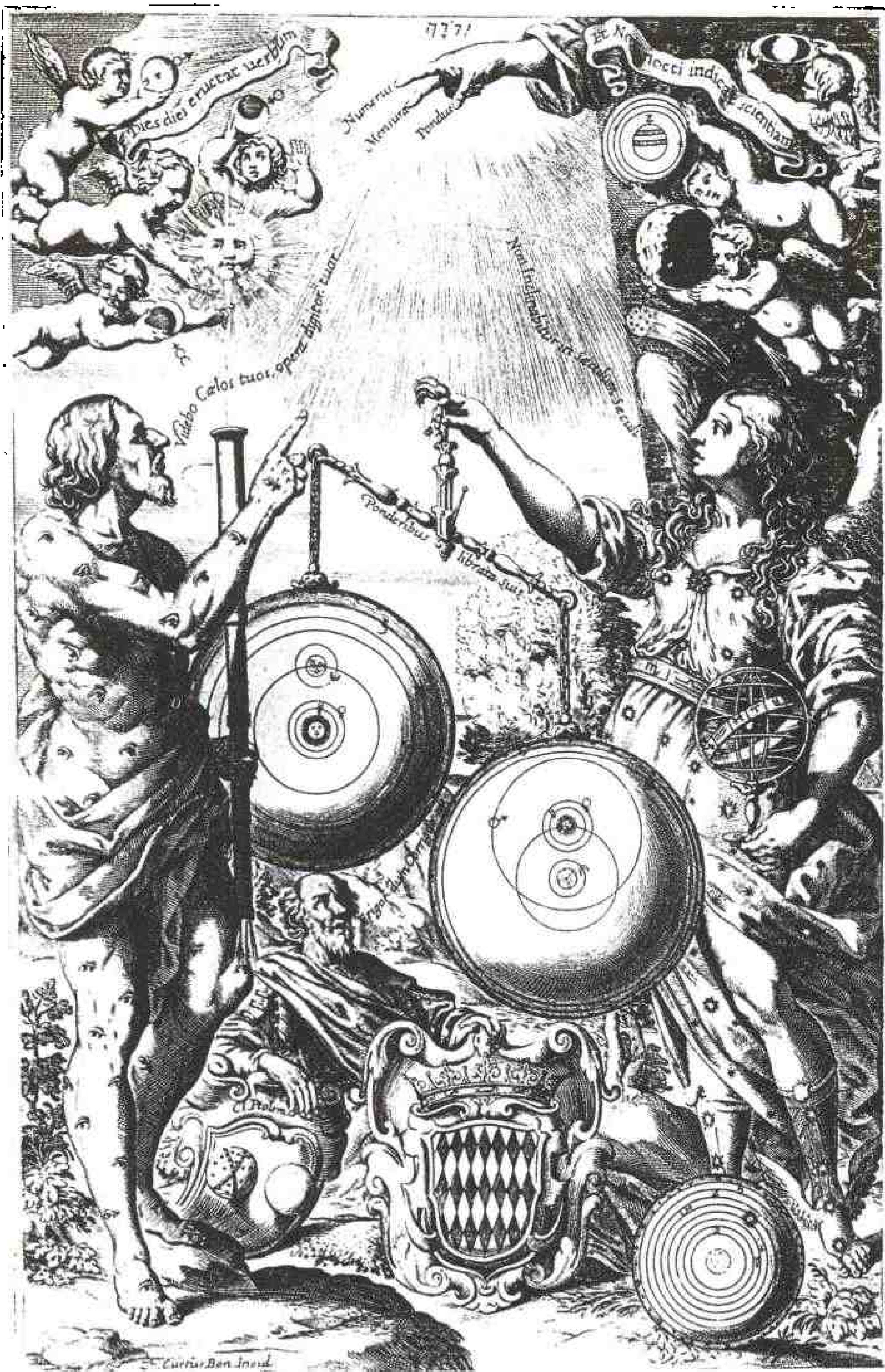
1623年，随着他的朋友和支持者巴贝里尼（Maffeo Barberini）被选举为教皇职位，伽利略在罗马的运气又发生了转变。1616年对哥白尼主义的责难消失了，在新当选的教皇对他进行了一系列令人鼓舞的接见之后，伽利略最后认为继续进行他长期计划的关于宇宙学的著作是安全的了。他的《关于两大世界体系的对话》出版于1632年，是一次关于托勒密和哥白尼学说相互优劣的讨论。但是题目被严重误解了：原因是到那时，托勒密体系在很大程度上已经被地心学说的信仰者抛弃了，而那些不能接受哥白尼日心体系的天文学家们——绝大多数——正在采纳第谷的或当时出现的其他折衷的地心学说方案之一。

以本地语言写成的《关于两大世界体系的对话》，对于哥白尼宇宙学的优点给出了精彩的陈述，并且有望远镜的证据作为支持。但作者也意识到，他的读者在感情上，不会愿意接受这样的事实：他们是飞驰在环绕太阳轨道上的旋转球体上的乘客。很多同时代的思想家都同意亚里士多德的观点：一支箭垂直射向空中，又落回到原地，由此证明了地球在箭飞行的时间内是没有移动的。

伽利略的反应，包括了重新评价运动的概念。对亚里士多德来说，一个自然的物体——无论它是不是活的——都可以通过它如何“运动”（亦即变化——位置的变化，或“位置运动”，只不过是几种运动中的一种）来揭示它的本性。在这种情形下，运动因此成为他自然哲学的中心，它在13世纪被同化到基督教框架中，又因此获得了更多的力量。

对亚里士多德来说，位置运动像所有的运动一样需要一个原因，因此要求一个解释；而静止是不需要原因的。伽利略对于位置运动给出了一个不同的观点。对他来说，并不是运动本身需要原因，而是运动的变化——加速度——需要。稳定的运动——其中静止是一个特例——是一种状态，保持这种状态会感觉不到运动。这就是为什么地球上的人在地球绕太阳旋转的时候感觉不到自己在运动的原因。

《关于两大世界体系的对话》采用了三个朋友之间对话的形式。萨尔维阿蒂（Salviati）代表伽利略，沙格列陀（Sagredo）是个很有理性的人，最后他赞同萨



耶稣会天文学家利乔里(Giambattista Riccioli, 1598－1671年)大型天文学知识纲要《新至大论》(Almagestum novum)的卷首插图。利乔里是第谷的同时代人与后继者之一，他也坚持地球(某些情况下有周日自转)为中心，太阳则带着一些或全部的行星围绕地球运动的体系。在利乔里的体系中、水星、金星和火星是太阳的卫星，而月亮、太阳、木星和土星绕地球旋转。图中司天文的女神乌兰妮娅(Urania)评价了利乔里体系和哥白尼体系，她宣判利乔里为胜者(图中他的体系在秤上显得更重——译者注)。托勒密的体系被遗弃了，它的作者委顿在地，表示了对他的体系进行了修正的新体系的敬佩。左边是百眼巨人阿耳戈斯·潘诺普特("洞察一切")，他在希腊神话中通身布满眼睛，象征着遍布星辰的天空。各种短语是圣歌的拉丁文翻译，而在最上边的，正如《旧约·但以理书》中伯沙撒王的盛宴上所出现的，一只凭空显现的手在墙上写出字来，不过这里写的是"数字、测量、重量"。①

① 《旧约·但以理书》记载，迦勒底国王伯沙撒举行盛宴，一只凭空显现的手在墙上写下了字句："弥尼弥尼提客勒乌法珥新"。智者但以理为国王解释其意为：你处事不公，国祚将亡，你的王国将要分裂，归于玛代人和波斯人。伯沙撒王当晚就被杀死了。——译者注

尔维阿蒂的观点；辛普利邱是一个亚里士多德主义者。真正的辛普利邱(Simplicius) 是公元6世纪时亚里士多德的评注者。但这个名字有令人不快的暗示，伽利略错误地把教皇的观点置于辛普利邱口中：即在最后，我们不得不接受这样的情况，上帝能够——事实上也可以——给出可观测的结果，“在很多方面都是我们的心智无法想象的”。伽利略本来想给这本书命名为《大海潮汐论》(On the Ebbing and Flowing of the sea)，从而将注意力集中到他的一个信念：确信潮汐现象可以由地球运动得到有力的说明（现在我们知道，这个信念是错误的——译者注）。在教皇的坚持下他改了书名；关于潮汐的论证仍保留在书中（即书中第四天的谈话——译者注），虽然穿上了假说的外衣，但伽利略对潮汐效应的意见不足以让人确信。

难怪教皇要不悦，尽管这看起来还不足以解释为什么罗马方面会采取极端的行动，召唤伽利略并指控他违反了1616年的法令。到最后，求情和讨价还价发生了——伽利略毕竟不是殉道者的料。他以将危害天主教会今后的名誉为理由公开放弃了哥白尼学说，尽管他的“牢房”是很舒适的，一开始和锡耶纳的大主教在一起，后来在佛罗伦萨附近的一座别墅中。即使是象征性的每周忏悔圣歌也由他的女儿进行。

如果伽利略意识到开普勒成就的意义——有耐心掌握他的作品——那么在他当时的局面中，他的论点将是多么有力啊！尽管开普勒通过出版《星际使者专论》(Dissertation with the Starry Messenger) 极力支持伽利略在《星际使者》中的望远镜观察，尽管有一封1612年一个朋友写给伽利略的信，信中说到开普勒的椭圆是一般知识，但伽利略一点也不欣赏开普勒提供给哥白尼学说的智力武器。

伽利略无疑从遍布开普勒思想中的神学几何和神秘和谐中退出了，并且一定对《新天文学》中无穷无尽的计算感到厌烦。另一个因素，是伽利略终生都没有能力从圆的诱惑中逃离出来。对他来说，并不是一个球在平面上随意滚来滚去（正如被我们教导去想象的），而是一个球在光滑的水平面上，这光滑的水平面是球形的，以地球的曲率弯曲着。

牛顿对这两个伟大的同时代人的十分不同的成就进行了综合。为了使这种综合成为可能，概念的抽象和澄清是必须的。伽利略的宇宙仍然保留有特权的地方，比如地球轨道周围能使球滚动的区域，比如太阳周围行星旋转着的区域。这些最后的空间不一致的遗迹，将不得不被放逐，一个由无限空间构成的完美均衡的宇宙——笛卡尔物理学的宇宙，正如它的作者解释的，不是别的，只是几何学。

笛卡儿和几何学家的宇宙

笛卡儿 (René Descartes, 1596—1650年) 和伽利略几乎在同一时期找到了自己的主要工作，但他属于更年轻的一代，并且形式上的差异也是很明显的。在中世纪的大学里，亚里士多德仅仅是“哲学家”，甚至到了伽利略时代，哲学家的影响仍然是主要的。因此，伽利略视他为主要敌人，离开对他的批评几乎不能写一页东西。笛卡儿是个自由的人，这意味着他的生活是游离于大学体系之外的。他看到与亚里士多德的论战已经获胜，亚里士多德已经不再经常提及他了；对笛卡

儿来说，他的中心工作不是摧毁而是重建——亚里士多德的推理被拒绝之后应当拿什么来填补这个位置。他自己无情的形而上学，导致他走向一个极端的立场：宇宙是无限的和均衡的，它的空间充满了按照碰撞法则运动的无差别的物质。

笛卡儿出生于图兰省与布瓦杜省交界处的拉埃镇（La Haye，今名“拉埃-笛卡儿镇”——译者注），他很幸运地在拉福赖（La Flèche）的耶稣会学院学习。耶稣会士们过去（和现在）都认为，一个牧师同时作为一个天文学家或数学家是不矛盾的，因此，在伽利略宣布了他的望远镜发现之后的头几个月里，拉福赖耶稣会学院的学生就知道了这件事。

寻求确定性

笛卡儿的老师培养了他对数学的热爱，更培养了他对数学可能带来的确定性的热爱。笛卡儿离开学校以后，在17世纪20年代早期，就开始考虑一个人在数学之外要获得相似的确定推理所使用的方法了。他逐渐得出结论：几何方法是关键。但是如何应用这种方法来研究自然界呢？困难在于，几何推理始于已经确定的原

笛卡儿

笛卡儿于1596年3月31日生于法国的拉埃镇，是一个显要人物的儿子。他就学于拉福赖的耶稣会学院，后从布瓦杜大学法律专业毕业。在很多年中，他的生活没有什么方向。他曾作为志愿者参加过多支军队，尽管1618年与德意志物理学家依萨克·比克曼（Isaac Beeckman）的相遇，曾激起过他对数理科学的热情，但直到此后第二年的一个晚上，他做了一连串的梦，才使他确信数学是通向真知之路。到1628年，红衣主教德·贝鲁勒（de Berulle）也极力劝说他发展这个想法，于是他返回荷兰后准备这样做。他在那里一直住到1649年，直到他禁不住诱惑，接受克里斯蒂娜女王（Queen Christina，瑞典女王——译者注）的邀请，到斯德哥尔摩去做她的宫廷哲学家为止。他在1650年2月11日死于斯德哥尔摩严寒的冬天。



理，而在日常生活中，人们认为真实的东西，也许实际上是一个他们从儿童时代就接触的、而且是不经思考就接受了的错误假设。

如何去掉这些错误？笛卡儿的解决方法——或者说他所主张的——是试图怀疑一切所谓的真理，因为只有那些经得起如此激烈怀疑的东西才是真实的。他的怀疑没有限制：特别是他问自己，是不是感官世界——他感觉到它的存在是那么确定——也许不像梦一样虚幻。

但是，在笛卡儿所有的发现中，有一件事情的真实性是不能怀疑的：他自己的存在。因为怎么能想象，没有自身的存在而能思考这个问题呢？再进一步，他能想象一个完美的人（上帝），这样一个完美的概念不可能产生于笛卡儿自己不完美的心灵之中，因此它只能来源于外部，来自这个完美的人。而且，这个完美的人，不会通过赋予自己在本质上有不可挽回之缺陷的智力的方式来欺骗笛卡儿。

笛卡儿的宇宙

正确地使用了人类的推理能力，就会有信心和力量，笛卡儿开始基于他心中"清晰和明白的"想法——这些想法仍处于天启的状况下——发展对宇宙的洞察。它们包括空间和运动的数学概念，笛卡儿告诉我们，古代的几何学家早已经理解了这些拥有同样令人羡慕的洞察力的概念。它们的洞察力是在它们的推理方法中显现出来的。几何的空间——完全无差别的和在各个方向上无限扩展的——就是真实世界的空间。几何学家所说的"运动"，也就是真实世界的运动。亚里士多德的运动概念，笛卡儿认为是不可理解的（尽管它已经被接受了两千年！）。运动，他告诉我们，现在就是简单的从一个位置到另一位置的移动，正如一个点移动时就定义了一条曲线，或一条曲线移动时就定义了一个曲面。

笛卡儿也分析了有关物质的概念，并且将它和空间的概念进行了比较。任何给定的物质都有颜色，蓝色、绿色、或者无色，因此颜色不是物质实际概念的成分。味觉也不是，嗅觉也不是，任何其他的性质都不是。孤立的物质有形状、大小和位置，再没其他。但是孤立的空间区域也是一样的。因此，笛卡儿做出了一个惊人的结论——除了物质可以"进入"空间之外——物质和空间是统一的。

重要的结果也随之产生了。因为只有一种空间和一种物质，空间不可能在密度上发生变化，因此非物质非空间的真空在概念上是可笑的。这个结果并不是针对宇宙运动的，在一个区域和另一个区域之间没有任何区别，整个宇宙是完全均匀同质的。

不同的是运动的结果。为了理解笛卡儿心里想的是什么，我们可以设想有一个巨大的水箱，水箱里面是静止的水和一块冰。这块冰开始旋转，随着旋转开始融化。假设这个旋转是在球形空间中，那里是由冰融化成的水。我们现在有一个全部是水的水箱（象征着笛卡儿的无差别的物质），在里面，一个球因为它通过运动而和周围不一样，因此才被区别出来。

在亚里士多德的宇宙中，个体的存在和运动总是按照它们的自然属性，个体的运动反映了它的自然属性。笛卡儿的宇宙观则不同，在笛卡儿的宇宙中，个体是通过运动被定义的——几乎可以说是被创造的。关于运动我们还能说什么呢？上帝是在所有的永恒之上的，这种特征反映在它的创世中，我们今天可能采用的

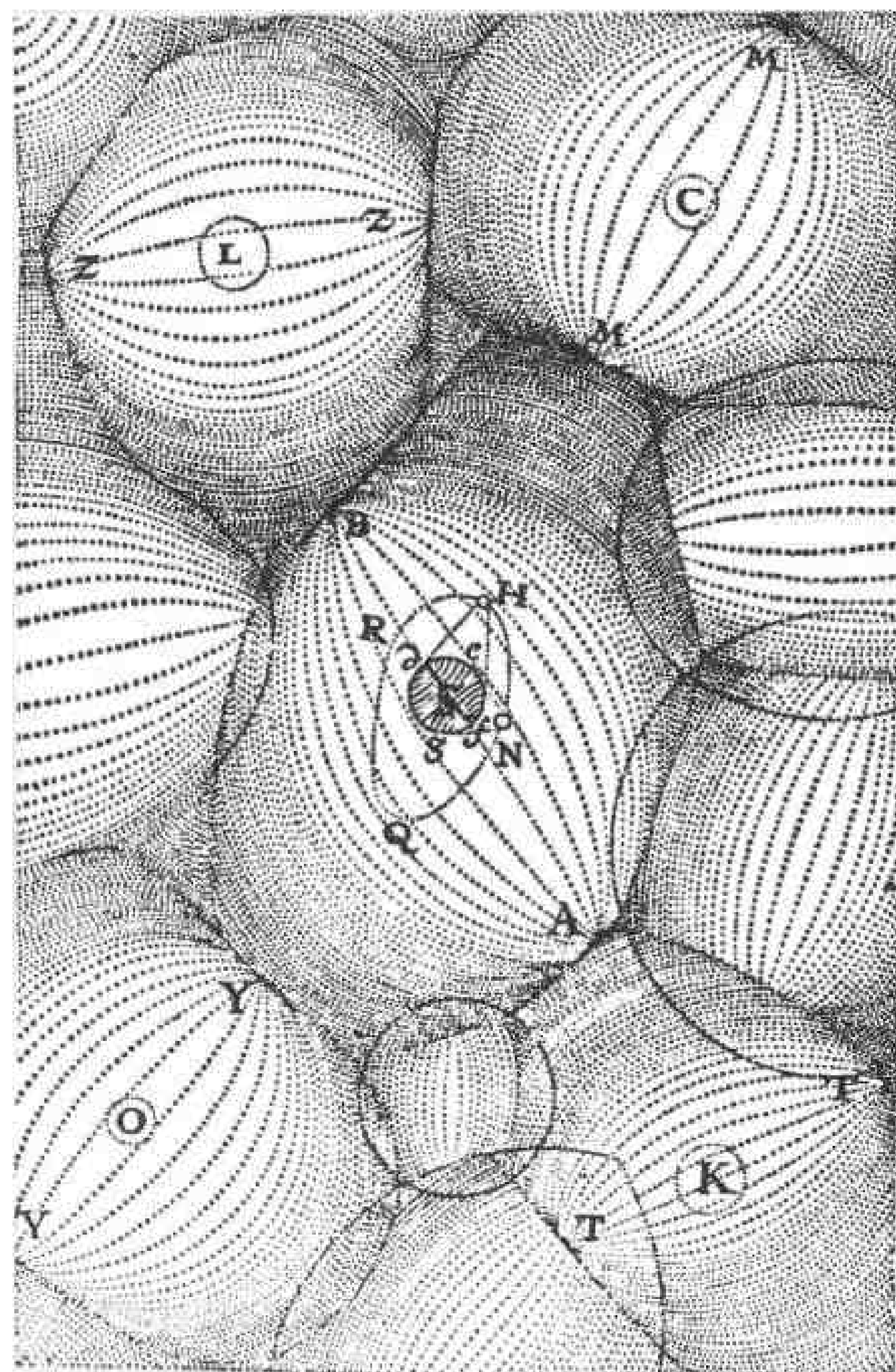
术语“守恒定律”：空间／物质是守恒的，（更有趣的）是运动——宇宙中运动的总量（速度乘以宇宙中物质的总量）和至少在趋势上是个体的运动——的守恒。

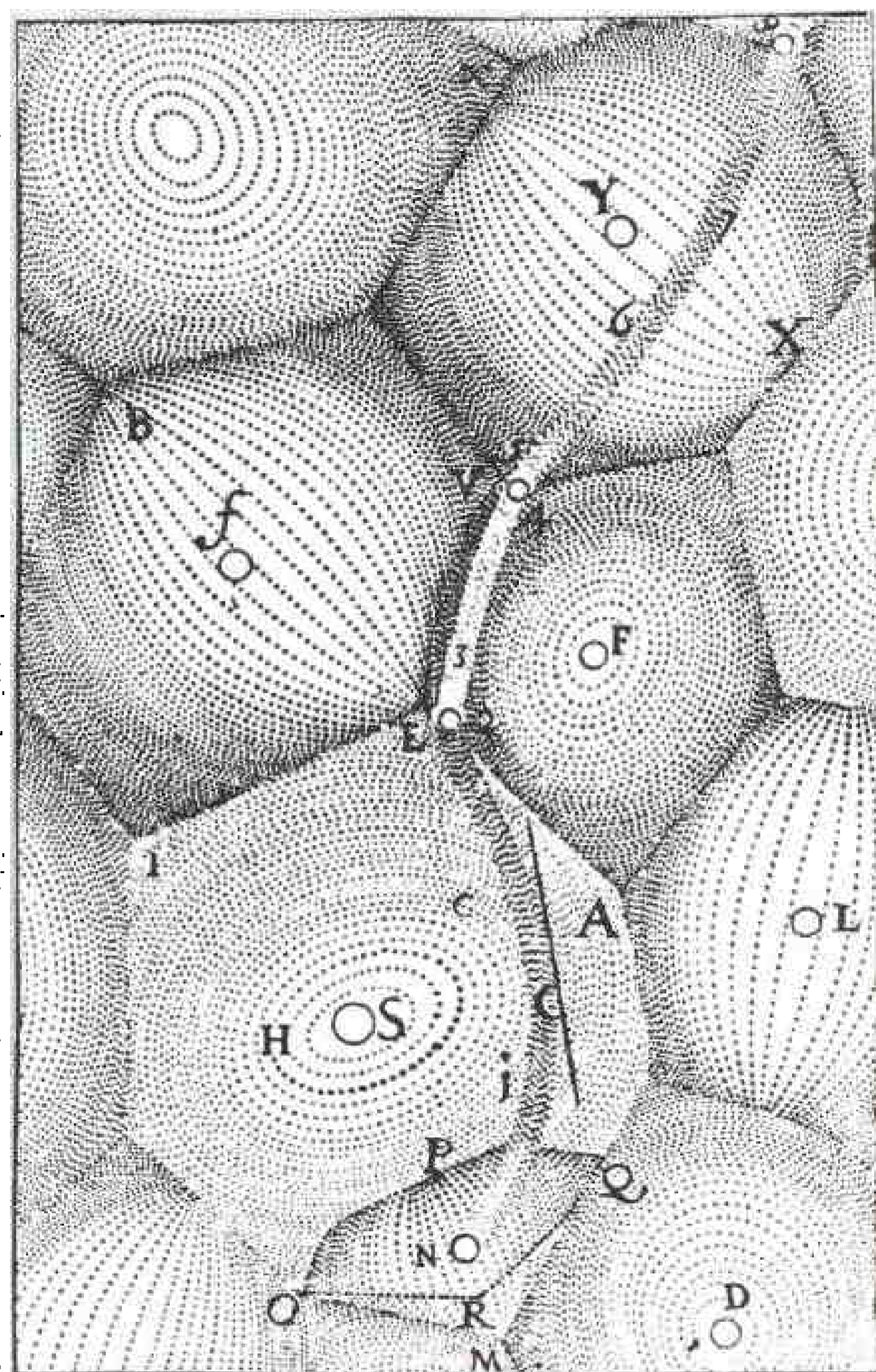
到了那个上帝所在的永恒的时刻，物体的运动趋于守恒。那时，物体以稳定的速度在稳定的方向上运动，因此它是直线运动——它趋于守恒。

笛卡儿的涡旋和彗星理论

在笛卡儿宇宙的一个典型区域中（左下方），太阳在图中心S点，而且只是一颗普通的恒星，它周围环绕着物质涡流，或者称为“涡旋”，涡旋里面有行星运行着。空间没有物质是不可能的，太阳涡旋和相邻的涡旋有一个边界，每个涡旋都有一个恒星在中心。涡旋的模型在各个方向上无穷无尽，整个宇宙无一处例外。

笛卡儿设想一个退化的恒星涡旋也许会瓦解，恒星将穿入另一个涡旋中。据动力学条件，该恒星将会变成一个行星，成为新的涡旋的永久成员；或是成为彗星，穿过一个一个的涡旋。右下方图中，在N点显示了一个毁灭的恒星，正穿过太阳涡旋（中心S），并且继续穿过一个个的涡旋。因此彗星在太阳系中只能见到一次。1758年哈雷彗星按照牛顿定律的预测又一次的返回，是对笛卡儿理论的有力反驳，当然那时笛卡儿宇宙学说的信奉者本来就很少。





斯特拉斯堡大教堂大钟的一幅1574年的木刻。大钟机构的复杂性使得它可以作为理解宇宙的一个极端特例，而上帝就是时钟结构的制造者。同时，时钟制造者对他的作品所能给出的清晰和可理解的解释，成为解释物质运动的科学范例。

但在实践中这是不可能发生的。因为没有无物质的空间，因此没有物体是孤立的。没有和周围前后的物质的协调运动，什么也不能运动。因此，运动有沿直线进行的趋势，它在实践中形成物质循环，即涡流或“涡旋”。

太阳系就是这样一个涡旋，它主要由无形运动的物质构成。就是无形的物质（而不是开普勒描述的不足信的太阳磁力，对于开普勒的成就笛卡儿似乎没有觉察）带动着有形的行星。同时，通过一种类似离心分离机的作用，人眼看起来似乎发光的小片受激物质被引向涡旋的中心，在那里它们形成太阳。这种情况也发生在其他大的涡旋中，每个涡旋都有一个太阳在中心。因此太阳是典型的恒星。

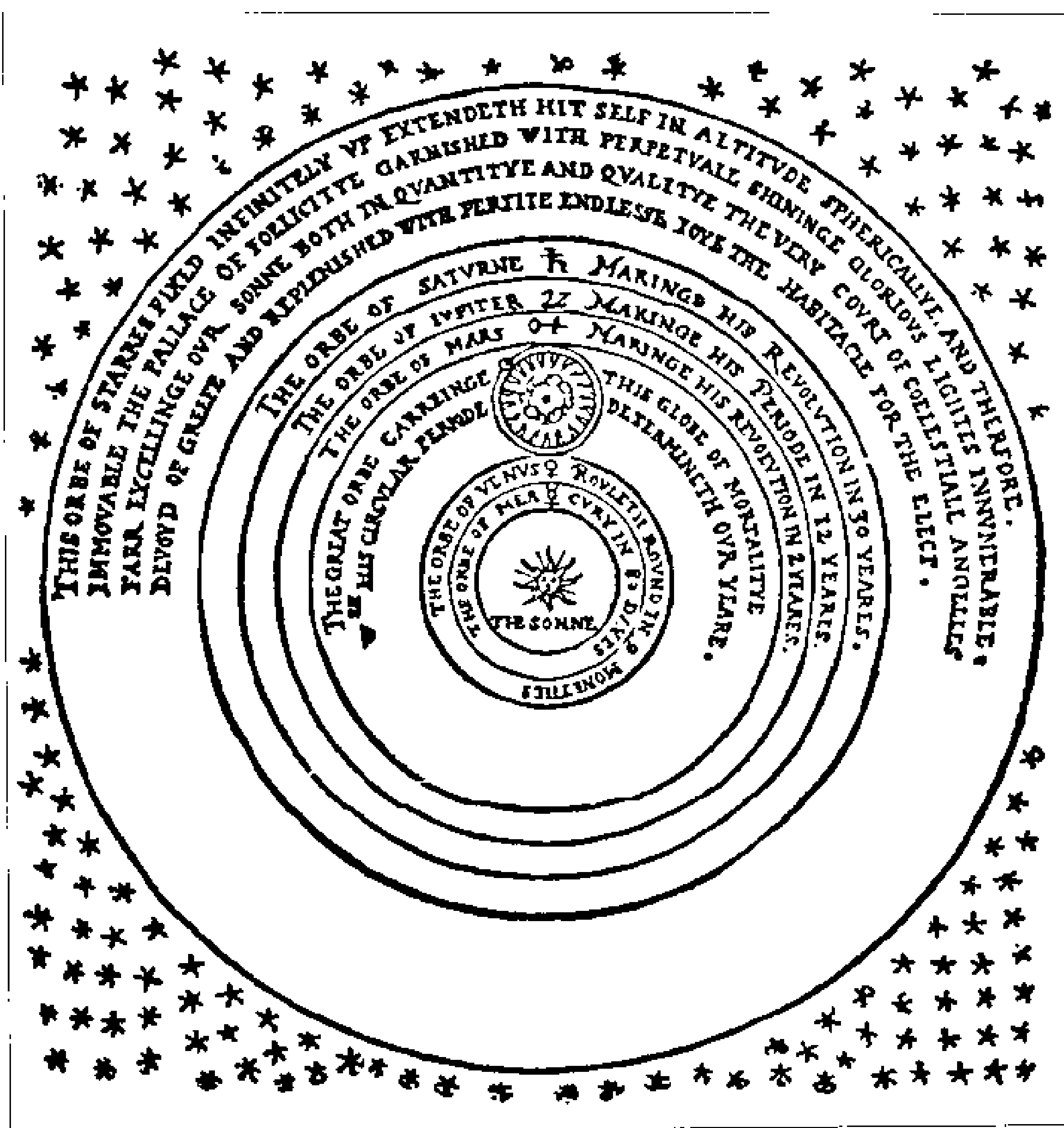
笛卡儿相信他从他的思想中得到的这个概念，已经进入了上帝造物者永恒的本性之中。确实，在他对自己立场的第一次阐释中——在伽利略受到教会谴责的消息的抑制之下，他给出了一个有意义的观点，即这种上帝的永恒性质必然会在他曾创造的或实际上能创造的任何世界中反映出来。这就意味着，当笛卡儿展示被永恒上帝所暗示的世界的特性时，这种特性不是简单地而是必然地成为我们世界的特性的。事情不能相反，因为上帝必须忠于他自己的天性。

但是，这里有一个对于笛卡儿来说，他的推理能在此基础上走出多远的问题，这个问题不仅存在于实践中，在理论上也是如此。他解释道，当上帝创造这些无限的构成我们世界的物质／空间时，他给它们安排了运动，并且让它们按照运动的规律来发展。但是上帝在许多运动模式中安排任何一种时都是自由的，因此从上帝做出了选择的第一原理，来进行推断是不可能的；因而从上帝的特别选择中推断随之而来的其他任何详细结果都是不可能的。类似地，我们所在的这个时空中的世界的性质——举例来说，我们是碰巧居住在这个有着现在的行星数目的太阳系中的；但这也可能有不同的情形，因此，为了研究我们这个特别的系统，我们不得不进行观测。

从有限宇宙到无限宇宙的转换

当哥白尼认为布满星辰的天空是静止的，而不是每天旋转时，他就克服了以为恒星离地球无限遥远这个认识上主要障碍。但即使是伽利略和开普勒望远镜口径的改革者（意为将望远镜的口径增大，因而可以看得更远——译者注），也相信宇宙是有限的，是笛卡儿的激进方法说服天文学家们相信了恒星是遍布整个无限宇宙的。

一个有趣的转换人物是英国数学家托马斯·迪格斯（Thomas Digges，约1546—1595年）。他在《天体轨道之完全描述》(Perfit Description of the Caelestiall Orbes）中——此文是附加到他父亲伦纳德（Leonard）的1576年版《永恒预言》(Prognostication Euerlasting）后面的，文中有一张哥白尼体系的图（见本书第130页，他为了追求概念的权威性而将其归于毕达哥拉斯）。图中在土星天球（“轨道”）外面有一个恒星天球，这个恒星天球“以球状无限扩展着其向上的高度”，但迪格斯仍没有脱离中世纪的宇宙观，天使之类仍被安置在恒星紧邻的外侧，并且在他的无限扩展的宇宙中，外层空间仍和中世纪一样，也是“天使的庭园”和“神学壁龛”。



尽管宗旨是要达到确定性，然而笛卡儿的科学计划依赖于观测和试验，还有所有它们带来的不确定性。并且因为笛卡儿已经为自己的宇宙学给出了详细的形而上学的基础，因此他的直系弟子在撰写他们的教科书时，感到能够跳过大多数的这种形而上学。为了说服他们的读者，他们改为依靠物质运动的直觉要求来解释宇宙。这种接近自然的方法被称为“机械论哲学”，并且在笛卡儿的《哲学原理》(Principles of Philosophy）中得到了明显的体现。

机械论哲学在古代的原子论者那里早就有了。当机械（对于这些机械，斯特拉斯堡大教堂精心制作的钟是一个杰出的例子）给出了一个关于宇宙的可信模型的时候，它特别的似是而非——之所以说模型是可信的，是因为钟的运作已经显示出，从机械论能够导出何等惊人的机械装置，其单个组成部分也可以从中得出颇为清晰的解释。

笛卡儿不是天文学家，但是他关于宇宙的图景是如此激进，以至于所有早期的宇宙学家都（以赞许的或其它态度）追忆亚里士多德，而现在的宇宙学家则都将追忆笛卡儿。随着1644年《哲学原理》的出版，人们逐渐接受了这种说法，即

太阳是同质的无限空间中的无数恒星之一，行星沿着起源于被机械冲力调整过的直线惯性（没有阻力的物体将沿直线匀速运动）轨道绕太阳旋转。牛顿将在笛卡尔的魅力下提前成熟；而当他最终放弃笛卡儿的几乎全空的宇宙观而代之以一种弥漫着神奇“引力”的宇宙时，他的很多同代人又会对他心生反感。

天文学改变了

从1543年哥白尼《天体运行论》到1644年笛卡儿的《哲学原理》出版，在这一个世纪中，天文学和天文学家所研究的宇宙都改变了。相对于它所面对的新生事物，哥白尼的著作僵硬地局限于圆周运动的天文学传统之中。对他来说，天文学家的任务和以前一样，是设计表达行星运动的几何模型。他的同时代人只有一少部分欣赏他，为了完善他的理论，哥白尼发现他自己不得不对亚里士多德的封闭和分级的宇宙——它在中心地球和环绕的天空之间的位置——进行调整。

过了几十年的时间，天文学家已经懂得了重复观察和精确观测的重要性，这些观测使用了设计和调试好的能够满足上述目标的仪器。他们已经能够通过仪器来扩展人类的感官，观看自古以来一直隐藏着的天体。他们也拓宽了目标，他们的研究不仅包括天体是如何运行的，还包括为什么——即对行星运动反映出来的力学的考察。

在这个过程中，宇宙自己也发生了变化，并且变化还非常之快。笛卡儿的《哲学原理》标志着和亚里士多德的宇宙及其自然位置的最终夭折，取而代之的是完全一致和无差别的几何学家的空间，在此空间中一种统一的无差别的物质在无限地复制着自己。

“我的物理学只是几何学”，笛卡儿在一封信中写道。但是研究笛卡儿的空间所需要的数学工具还没有被发明出来，因此，他和他的追随者不得不使用词语代替符号。就眼前来说，这是有好处的，因为很多有教养的、常去巴黎沙龙的学者能够理解笛卡儿的物理学，正如剑桥的大学生能够理解它一样，在剑桥大学笛卡儿主义变得风行一时。但是，尽管笛卡儿主义者能够足够真实地解释天体当前的状态，却不能预测它们的将来。牛顿定量物理学的预测能力，将及时证明它的不可抗拒性，那时笛卡儿将随着亚里士多德一同成为历史。

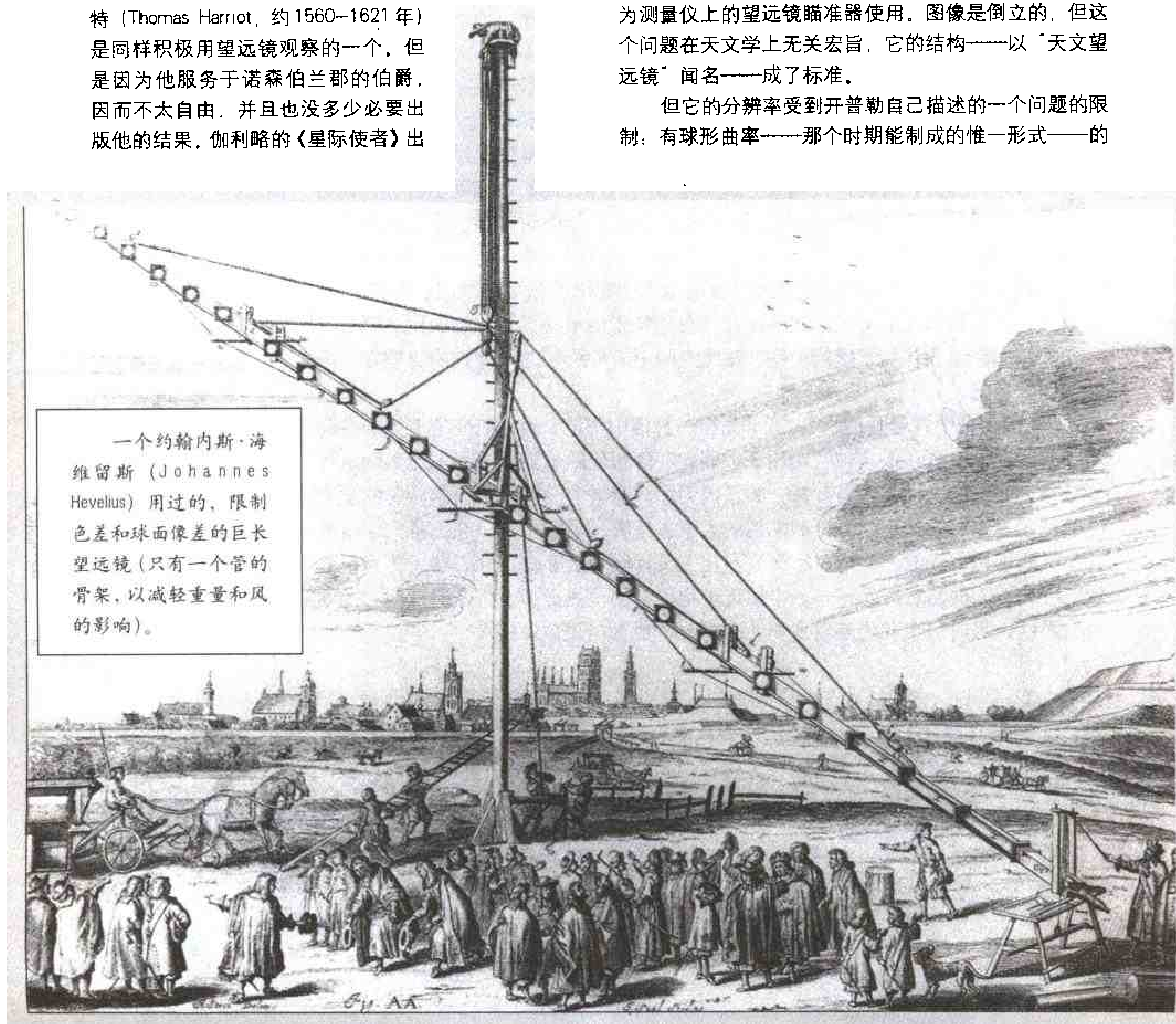
17世纪的折射式望远镜

1609年，当伽利略将他自己制作的望远镜对准天空时，他也给了这种已经闻名了十年、可能具有重要军事价值的光学装置一个充满想像力的用法。伽利略的仪器有凸起的"物镜"（它使光聚到一点）和凹陷的"目镜"组成，能放大20倍。镜片是可以得到的，因为制作眼镜需要这样的镜片。但用其制作望远镜，它们的质量显然太差了，因此他的仪器的分辨率是很初级的。

伽利略是那个时期最著名的望远镜观测者，但他不是惟一的。在英格兰，托马斯·哈里奥特（Thomas Harriot，约1560－1621年）是同样积极用望远镜观察的一个。但是因为他服务于诺森伯兰郡的伯爵，因而不太自由，并且也没多少必要出版他的结果。伽利略的《星际使者》出版之后，望远镜成了每一个宇宙学讨论参与者的称心工具，因此，人们对它的需求随着人们改善它性能的兴趣一起不断增加。

开普勒通过设计一个与众不同的望远镜来回应伽利略的首创。他的望远镜有一个凸起的目镜，他的设计公布于1611年。他的仪器视野较大，能够将图像投影到屏幕上，在观测太阳黑子时很有用（见本书第119页）。它有一个功能在这个世纪的后期变得非常重要，即开普勒望远镜可以安装一个测微目镜（见本书第154页），或作为测量仪上的望远镜瞄准器使用。图像是倒立的，但这个问题在天文学上无关宏旨，它的结构——以"天文望远镜"闻名——成了标准。

但它的分辨率受到开普勒自己描述的一个问题的限制：有球形曲率——那个时期能制成的惟一形式——的



一个约翰内斯·海维留斯（Johannes Hevelius）用过的、限制色差和球面像差的巨长望远镜（只有一个管的骨架，以减轻重量和风的影响）。

第一幅真实的月面图，米歇耳·弗洛仑特·范·兰格林（Michel Florent Van Langren）在1645年公布。因为在特定的月亮山峰的日出和日落，是在地球上广大地区能够看到的时间信号，故范·兰格林希望航海者如果有必要的图表，他们就能利用这样的信号将他们的当地时间与标准时间进行比较，从而确定他们的经度。

透镜不能使平行光集中到一点上，也就是说，是众所周知的"球面像差"造成了图像的模糊。所有研磨和抛光非球面透镜的尝试在17世纪都失败了。而且还有第二个问题，"色差"，光不能清晰地从球形透镜中被分辨出来，即使一个透镜能够使单色光聚焦，但不同颜色的光有不同的折射率，这一性质仍然使天文学家得不到清晰的图像。

惟一能进行的实际测量是采用小曲率的也就是有长焦距的透镜，和引进能限制来光到中心部位的小孔。长焦距意味着比较长的望远镜，到17世纪中期，一个好的天文仪器将有三十多英尺长，一般需要一个桅杆和一组滑轮来安置和操纵它。这个世纪最重要的望远镜观测者约翰内斯·海维留斯（1611－1687年）曾经有一个格外长的望远镜，其长度达到150英尺长。但是如此巨大的仪器是很难操纵的。惠更斯甚至曾设计了一个在物镜和目镜之间没有物理结合，只有一条由观测者操作的绳线相连的望远镜制作方案。

惠更斯的高竿的望远镜，在物镜（光进入的镜头）和目镜之间只有一条线相连。

（杨泽忠译，江晓原校）

第六章　牛顿和牛顿主义

人们通常凭想象认为，开普勒行星运动三定律是直接从观测数据中总结出来的，并因此觉得它是可信赖的，是无可争议的。事实真相远非如此。

开普勒第一定律说的是行星在椭圆轨道上运动，太阳位于椭圆的一个焦点上。我们知道，1609年，开普勒在其《新天文学》一书中首次提出了该定律。他是运用一种令人不太放心的动力学，通过烦琐的运算而得出这一结果的。几年后，他在其《哥白尼天文学纲要》中又提及了该定律。因为这次他叙述得简明扼要，第一定律从此才广为人知。天文学家们长期以来怀有一种梦想：用一种人们熟知的简单几何曲线来描述行星轨道。第一定律的提出使他们梦想成真。毫无疑问，开普勒的椭圆对中世纪的天文学家们是富有吸引力的。

然而，生活在牛顿之后的人们知道，开普勒第一定律并非严格成立：行星在椭圆轨道上运动时，由于受到其他行星的吸引而产生摄动，甚至偏离椭圆轨道。当然，在17世纪中叶，观测数据的精度还不足以揭示这种复杂性。但是，观测数据也从未达到让我们可以在一个椭圆和多个非常接近于该椭圆的准椭圆之间做出选择的那种精确程度。

第二定律同样是在《新天文学》一书中被提出来的，又在《哥白尼天文学纲要》中被再次做了论述。该定律指出，从太阳到行星的连线在相等的时间内扫过相等的面积。但是，不但摄动再次使得该定律至多是一种近似，而且它还完全超越了17世纪天文学家们的理解能力，他们无法证明这样一种复杂的数学关系。

无论如何，别的替代理论总还是有的。因为行星轨道近似于圆形，所以有大量"等价"的理论能够被发明出来。由这些理论计算出的位置使得行星运动看上去是均匀的。从观测的角度来说，这些理论与开普勒第二定律不相上下。它们有其巨大的优点：在形式上为人们所熟悉，在数学上又易于驾驭。

但它们并非该领域开普勒第二定律惟一的替补者。事实上，面积定律意味着在两种情况下，行星的速度v与行星到太阳的距离r成反比（$v \propto 1/r$）。这两种情况对应于行星位于椭圆轨道的主轴的两端。然而，如果椭圆接近于圆，行星运动速度就近似地与其轨道到太阳的距离成反比。正因为如此，一些天文学家认为这种反比定律才是真实的，对于他们来说，面积定律本身倒是一种近似。

第三定律发布于1619年的《宇宙和谐》一书。该定律指出：行星轨道周期的平方与其距太阳距离平均值的立方之比为常数。人们也许指望这条定律会被容易地加以证明，因为处理距离和周期是天文学家们的拿手好戏。但情况实际上很复杂：水星、甚至金星，因为距太阳近而难以观测；摄动也在起着作用；而且正如牛顿所言，该定律本身也需要修正。

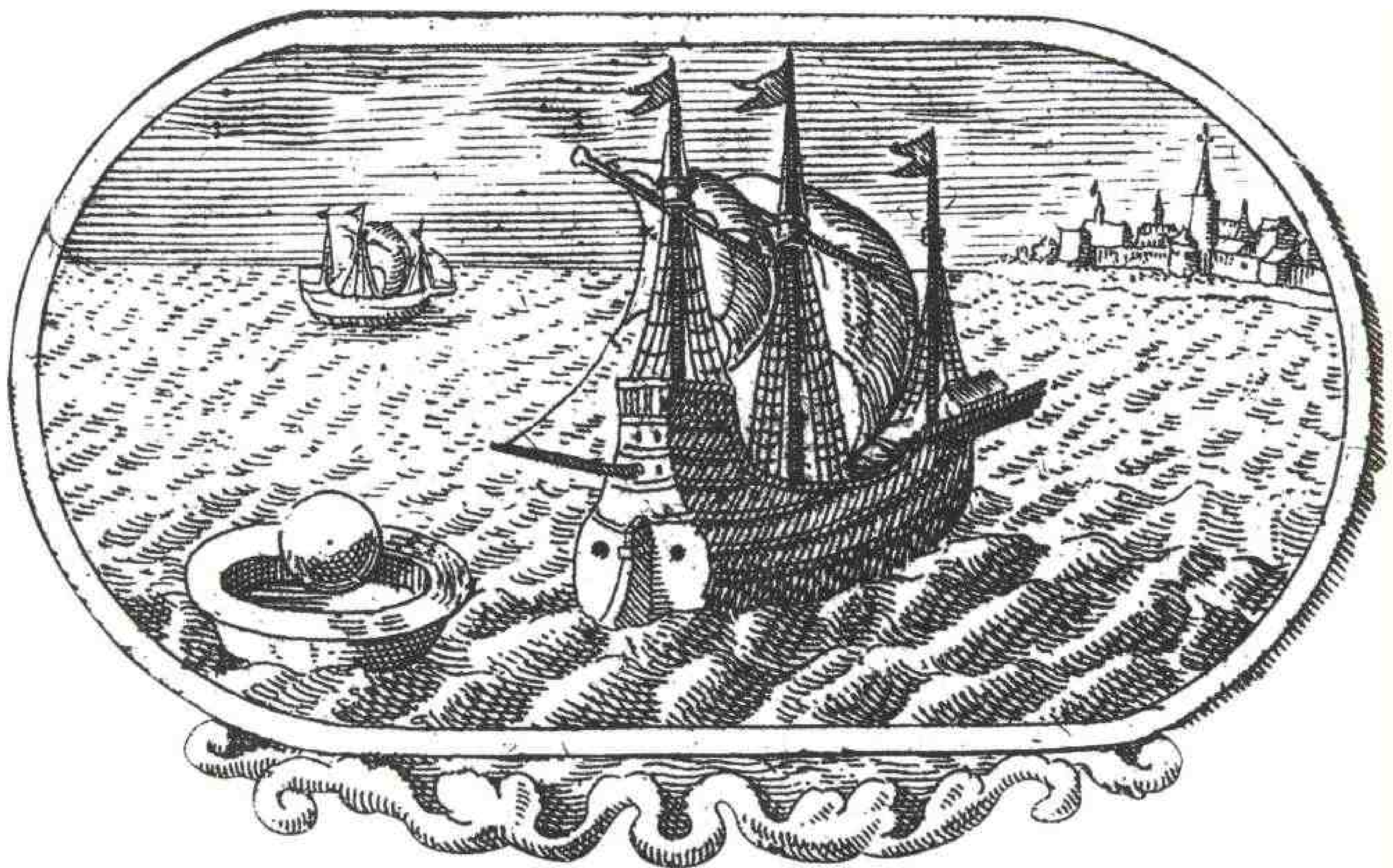
牛顿《原理》之起源

尽管开普勒定律存在着局限性，但它们还是为天文学家提供了一些关于行星运动的图景。它们讲述的是行星如何运动，而不是为什么运动，没有提及导致运动的力。开普勒认为，行星本身是懒惰的，它之所以会持续不断地向前运动，是由于受到了旋转着的太阳的某种推动作用，否则它就会进入静止状态。另一方面，笛卡儿则指出，从原则上说，行星在未受外界影响的情况下，将以匀速状态继续沿直线向前运动。笛卡儿的宇宙充满了物质，因此位于其中的行星永远都会受到外界的影响。他认为，行星处于太阳的涡旋之中，并受到宇宙物质四面八方的挤压作用，这些压力使得行星轨道脱离其直线状态而弯曲成近乎一个圆。

磁哲学

另一方面，位于伦敦的皇家学会（建立于1660年）的成员们继承了各种各样的传统，其中之一就是威廉·吉尔伯特（William Gilbert）的传统。1600年，吉尔伯特提出，地球是一个巨大的磁铁（见第109页）。吉尔伯特是位医生，是个典型的讲求实际的人，时常造访格雷汉姆学院。该学院是伦敦商人托马斯·格雷汉姆爵士（Sir Thomas Gresham）建立的，它完全不同于牛津和剑桥这两所大学。在该学院里，教授们主要以英语授课，讲课方式尽量贴近学生，学生则由那些仪器制造者、航海家、医生和别的爱好实用技术的人们所组成。

采自1628年出版的吉尔伯特《论磁》一书的卷头插图。吉尔伯特认为，地球的磁性与球形磁石的性质相似，因此他把球形磁石叫做“小地球”（terrella）。他研究了磁极和地理北极的差别、以及罗盘指针的“倾角”与水平位置之间的差别。他觉得航海家们如果搜集到了足够多的关于这些量的数据，他们就可以用这些数据代替经度了，因为经度的判定是非常困难的。他们的基本工具应该是装在浮板上的球形磁石，如图左侧所示。



罗伯特·胡克（Robert Hooke）

胡克于1635年7月18日出生于英国赖特郡的伊斯利，他的父亲是位牧师。他是在伦敦的威斯敏斯特学校上的学，并于1653年进了牛津的基督教堂，在那里做唱诗班的领唱和仆人。

约翰·威尔金斯是那些把大学变成英国科学生活中心的人物之一。在牛津的学术圈子里，胡克成了年轻的克里斯托弗·雷恩（Christopher Wren）的密友，并且由于在空气泵方面的工作而成为罗伯特·波义耳（Robert Boyle）的助手。到了1660年君主政体恢复的时候，牛津学术圈里的许多人已经搬到了伦敦，并于当年的11月在那里成立了皇家学会。

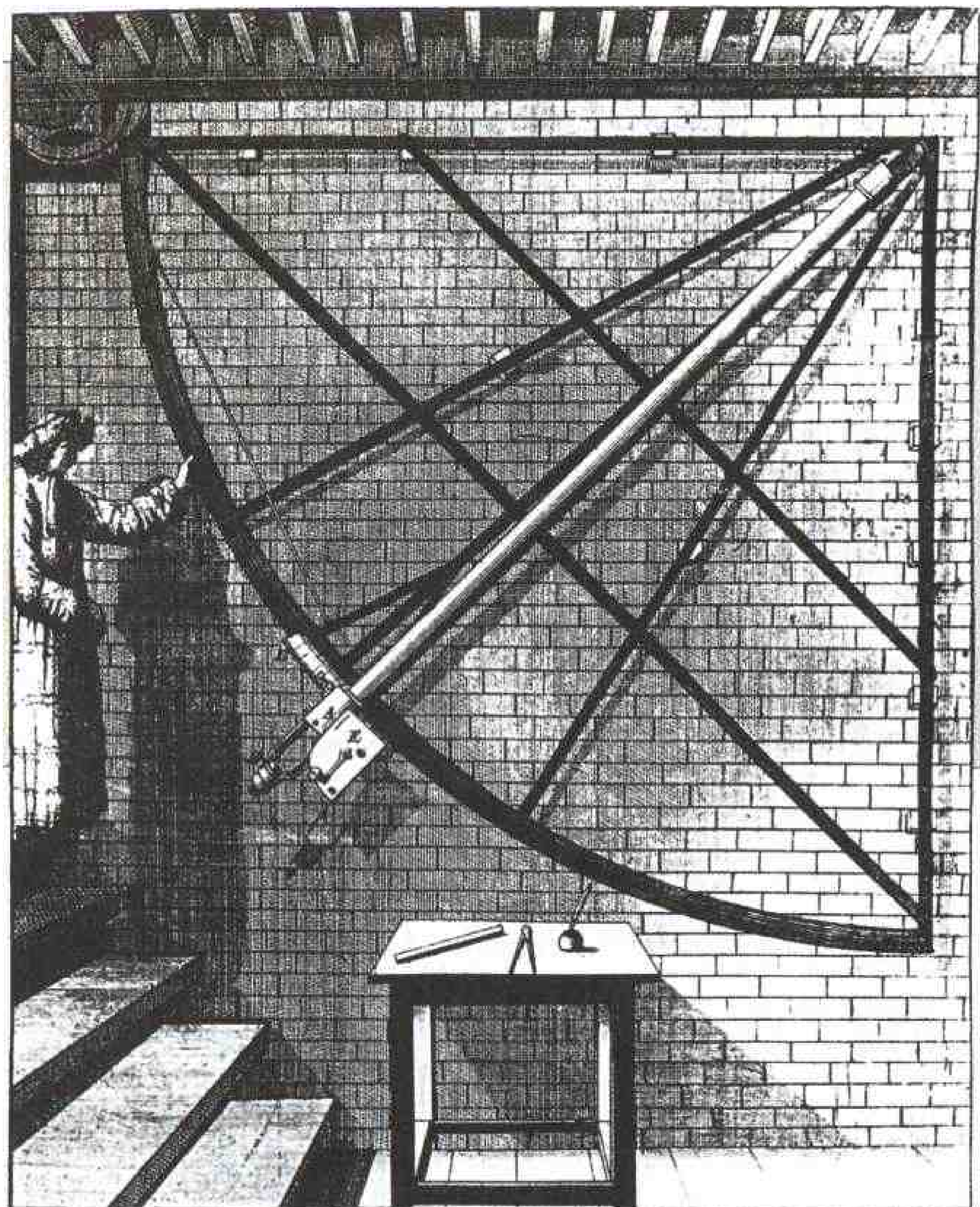
1662年，胡克被任命为皇家学会的"实验总监"。该职务是一个带薪职位，这使他很快就能在格雷汉姆学院租房居住。1665年，他成了格雷汉姆学院的几何学教授。1666年的伦敦大火又导致他成为负责监督重建工作的管理者之一，而实际上他扮演的是更为重要的设计师的角色，其重要性仅次于雷恩。

胡克众多的职责进一步加强了他那天生的对一些重要思想浅尝辄止的倾向。他从未将其科学潜力充分发挥出来。从1677年开始的几年里，他担任皇家学会的秘书（在这一位置上他做得并不好），同时负责《皇家学会哲学会报》(Philosophical Transactions)。正是这一资格使他于1679年开始与牛顿通信，使得牛顿走上了《原理》之路。胡克于1703年3月3日在格雷汉姆学院他的寓所去世。

从17世纪早期到中叶，格雷汉姆学院一直保持着它自己的实验科学传统，正是由于这一传统，吉尔伯特的"磁哲学"取得了令人景仰的地位。17世纪40年代，英国爆发了那场最终导致国王查理（King Charles）于1649年被处死的内战，战争的胜利者利用格雷汉姆学院的一些研究人员对牛津的保皇党施加了影响，其结果是那些研究人员很快就在牛津身居要职。但这种做法反过来却使格雷汉姆学院的研究队伍受到了某种程度的削弱。不过学院重视实验科学的传统依然存在，随着1660年君主政体的恢复，格雷汉姆学院再度成为首都科学界关注的焦点。实际上，当年11月的科学家们的一次非正式会议，就是在格雷汉姆学院的一次天文学课程之后召开的，正是那次会议最终导致了皇家学会的成立。

在17世纪中叶，格雷汉姆学派的领袖人物是约翰·威尔金斯（John Wilkins，1614–1672年）。1640年，威尔金斯再版了他的《月亮世界的发现》（Discovery of a World in the Moone）。在该书中，他从理论上探讨了月球旅行的可能性。据他看来，这种可能性是存在的。他认为，既然吉尔伯特已经指出，环绕在球形磁石四周的引力空间是有限的，其尺度也许只有20英里，因此太空旅行者可以摆脱地球磁场的影响。然而，当威尔金斯进一步讨论该空间的时候，他发现要确定引力的零效应区域的严格边界是不合情理的，原因在于"磁力减弱的程度也许是与其距地球的距离成正比的"。

1648年，威尔金斯被任命为牛津大学瓦汉学院的院长。正是在牛津，新一代人物中的两位天才会聚在了他的大旗之下。他们是克里斯托弗·雷恩（1632–1703年）和罗伯特·胡克（1635–1723年）。人们还记得雷恩与胡克一道都是1666年大火之后伦敦重建的设计师，但他实际上是一位天文学教授，先是于1657–1661年在格雷汉姆学院，接着是在牛津任职。



生性好斗的罗伯特·胡克特别强调要把望远镜安装在天文仪器上进行测量。他为格林威治天文台设计了半径达10英尺的四分仪，并在四分仪上安装了望远镜。这一做法在天文学界是相当早的。四分仪于1676年安装完毕，但事实证明他的设计并不成功，这部分是由于他在仪器上没有标上完整的90°刻度的缘故。胡克在仪器上安装了一个滑动的弧块，弧块上标上了5°范围的刻度。观测者必须把它固定在一个合适的位置才能进行测量，这就使得测量时操作起来不那么方便。

行星如何在其轨道上运动？彗星又遵循什么路径？地球的磁引力如何随着距离的增加而减小？诸如此类的问题，一再在这两位朋友和他们的熟人之间被讨论着。1662年和1664年，胡克曾两度试图证明地球的引力随高度的变化而变化。先是在威斯敏斯特大教堂，尔后又在古老的圣保罗大教堂。在教堂高高的阁顶，他先测量了随身带上去的物体的重量，然后将其悬吊到接近地面的水平，再测量其重量。当然，他什么变化也没有测出来。

罗伯特·胡克和早期的皇家学会

1666年，为了说明他关于太阳与地球、月亮之间的相互作用的新想法，胡克向皇家学会展示了一个摆，摆线在尾部分成了两根，一根连着一个大重物，代表地球，另一根连着一个小重物，代表月亮。这两个重物相互绕着运转，组成一个系统，该系统作为一个整体又绕着“太阳”运转。在此之后，胡克在让人们了

解他的思想方面进步迅速。1674年，他在一段文字中总结了自己所获得的成就。在已有的天文学史的出版物中，那段文字颇为出类拔萃。这就是以三个假设形式出现在他的《证明地球运动的尝试》(Attempt to Prove the Motion of the Earth) 那本书中的一段话：

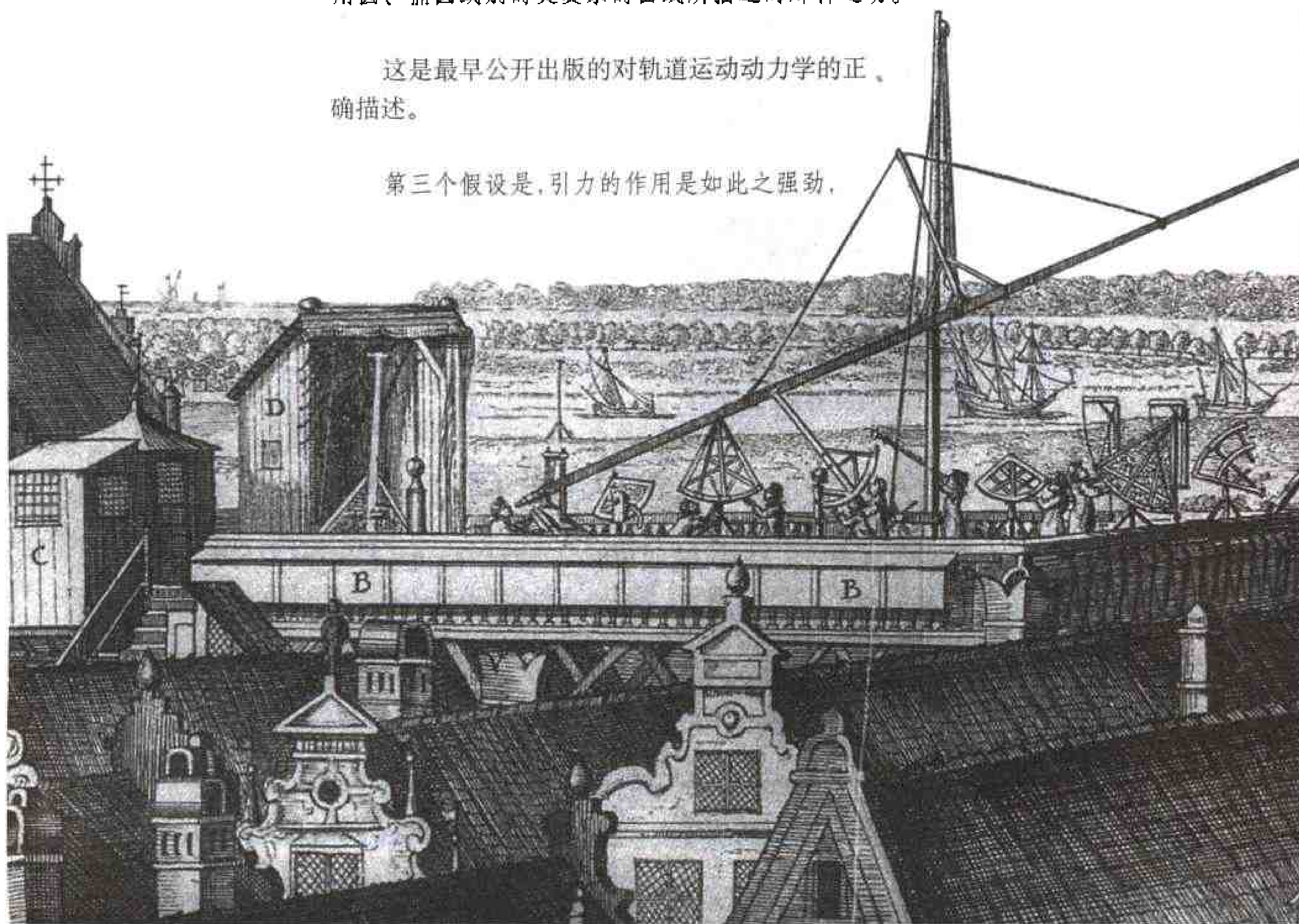
第一，所有的天体，不管它们是什么，都有一种指向其中心的引力或曰重力，靠这种力它们不仅吸引自己的各个组成部分，阻止这些部分飞散（正如我们所看到的地球那样），而且确实也吸引位于其活动区域之内的别的天体……

胡克认为，地球不但吸引太阳和月亮，吸引别的行星，而且它也被这些天体所吸引。行星间的这种引力与地球将其各个部分保持在一块儿的重力是一样的。然而，他的“活动区域之内”的说法表明，他并没有意识到这些引力是万有的。

第二个假设是，已经在做直接和简单运动的所有物体，不管它们是什么，都要沿直线继续向前运动。只有在受到别的有效的力的作用下，才会偏斜或弯曲成用圆、椭圆或别的更复杂的曲线所描述的那种运动。

这是最早公开出版的对轨道运动动力学的正确描述。

第三个假设是，引力的作用是如此之强劲，



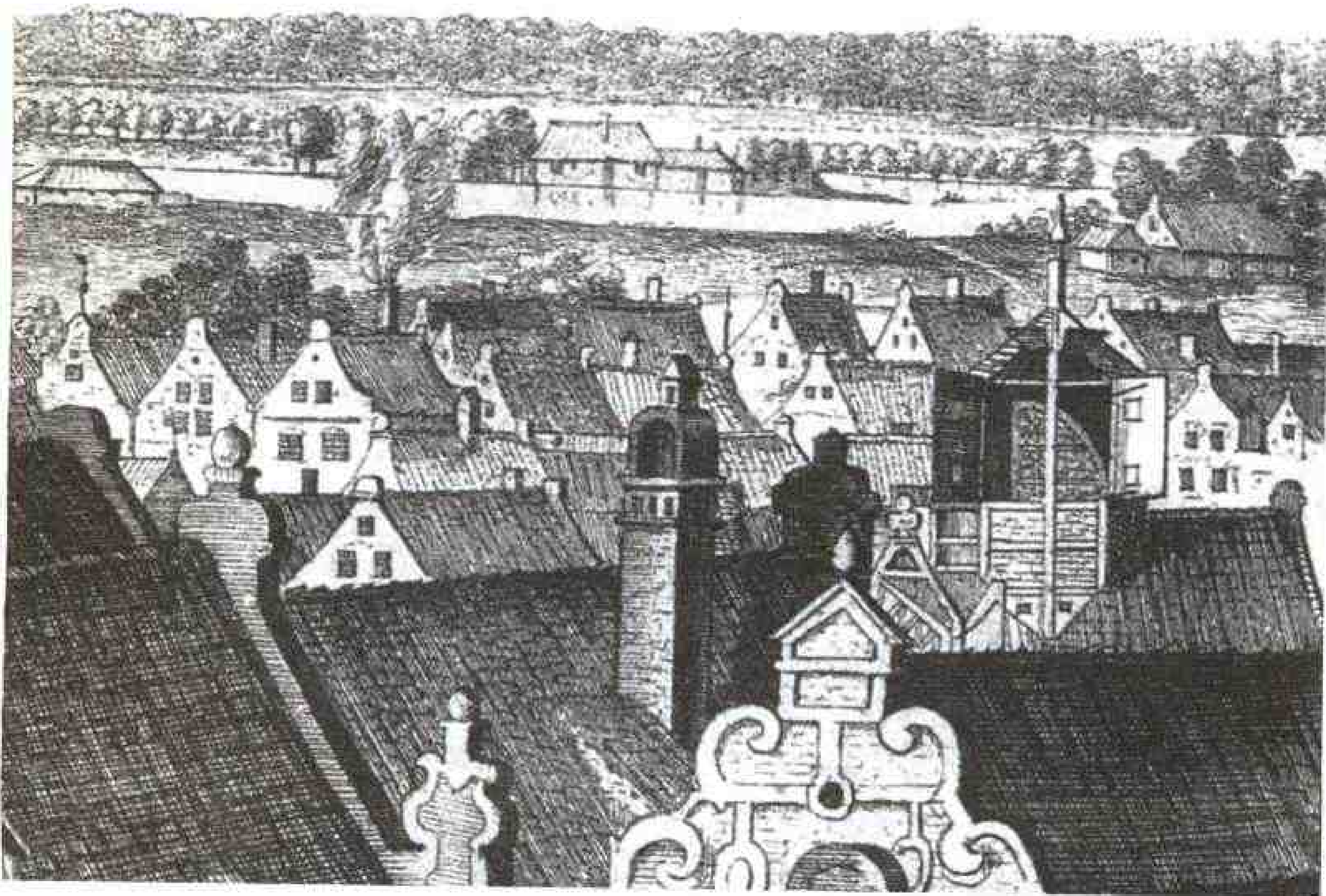
不管作用在其上的物体离得多近，引力仍然指向它们自身的中心。

胡克认为，引力随着距离的增加而减少。但是引力究竟是与距离本身成反比（$f \propto 1/r$），还是与距离的平方成反比（$f \propto 1/r^2$），或者是别的什么形式？胡克给不出确切的答案。同时他也认为，具体答案相对来讲并不那么重要，他只给出了这样一个不太确定的结尾：

> 虽然这几种情况我还没有用实验证实……懂得圆摆和圆周运动性质的人，会轻而易举地明了该原理的全部背景。

对于这些诸多可能性而言，显然应该选择力与距离的平方成反比（平方反比律）。无论如何，太阳或行星的亮度就是以与此相同的方式减弱的。但是，人们有别的理由怀疑平方反比律。当笛卡儿等试图分析作用在轨道运动上的力时，他们就不得不怀疑该定律了。当一个投石者开始用索链旋动石头时，他感觉到石头对他有一种强劲的向外的拉力。在松手之前，石头在索链一端沿圆周路径运动，这似乎是投石者指向中心的束缚力与石头背离中心的向外的拉力相互平衡的结果。（今天我们知道，这种分析是错误的。）对有关转动结构的文献研究的结果表明，这种分析陷入了对沿转动着的绳子的拉力——向内的向外的拉力——的考虑之中。）1673年，荷兰物理学家克里斯蒂安·惠更斯（1629－1695年）在一本书中指出，抛射出去的物体向外的拉力与其速度的平方被半径所除的商（v^2/r）成正比。

现在，开普勒的第三定律告诉我们，行星运动周期的平方与其轨道半径的立



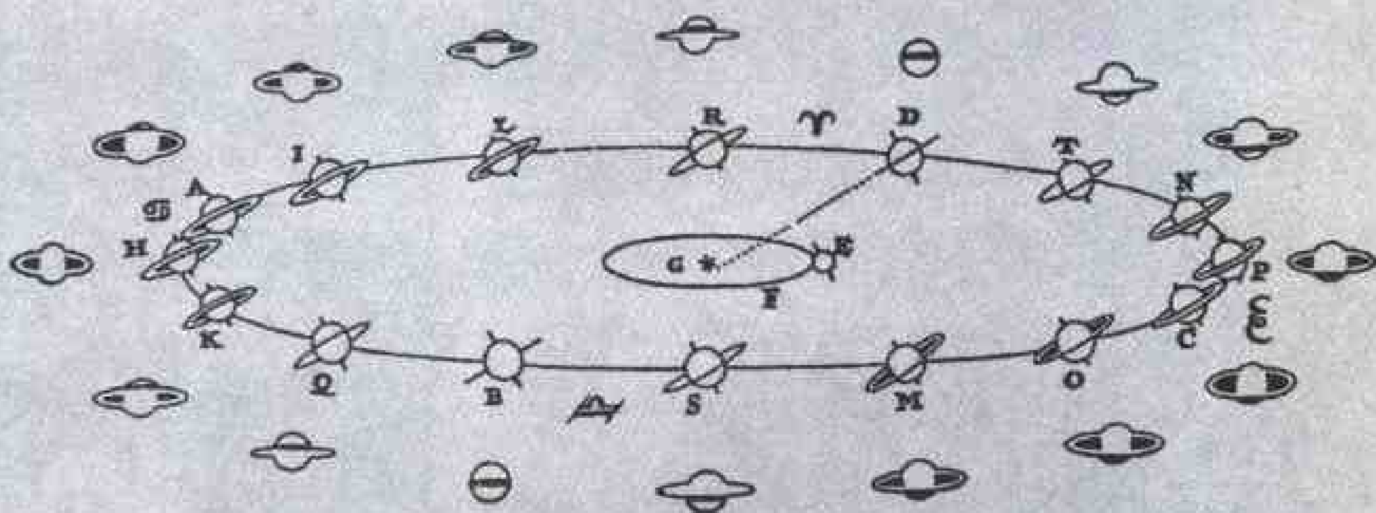
但泽富商约翰尼斯·海维留斯（1611－1687年）的天文台。观测平台架设在三个毗连的房子上，上面安装了大量仪器，包括用吊杆悬吊起来的长焦距折射式望远镜及第193页所示的可移动的六分仪等。右侧尽头处有一个独立的塔楼，塔楼的门敞开着，露出了其间的象限仪来。这是当时欧洲最好的天文台，1679年它毁于火灾。



克里斯蒂安·惠更斯

克里斯蒂安·惠更斯于1629年4月14日出生于海牙。他的父亲是一位杰出人士，在他父亲有限的几个朋友之中，笛卡儿就是其中之一。在献身于物理学和天文学之前，他在莱顿和布莱达（Breda）大学学习法律。1655年，惠更斯和他的兄长一道，学会了研磨用于望远镜的透镜。在那年的冬天，他发现了土星最大的卫星土卫六"泰坦"，并且认识到用一个保持一定距离的、平坦的环可以解释土星那神秘的附加物。在此之后不久，他发明了摆钟。

1661年，惠更斯访问了伦敦，并由于对碰撞定律的研究成为皇家学会的会员。5年后，他成了法国科学院的元老院士。在法国，他一直住到1681年，然后回到海牙。1695年7月8日，他在海牙去世。



惠更斯画的一幅图，图中的土星外围有一个环，惠更斯以此来说明土星附属物那变化不断的形貌。有意思的是，他的这一思想产生于1655－1656年，而那时土星环正处于不可见状态。

方的比值为常数（例如为k）。假定所有行星都是以恒定的速度沿圆周运动，而不是以变化的速度沿近似于圆的椭圆运动，既然周期等于周长（$2\pi r$）除以速度v，那么对于每一个行星来说，这一定律就应当被描述成 $(2\pi r/v)^2 = kr^3$，这就是说，惠更斯的引力 v^2/r 是与 $1/r^2$ 成正比的。

这样，平方反比定律就成了非常明显的选择。然而，行星的真实运动轨道并非正圆，其运动速度也不是均匀的，行星是以变化的速度沿椭圆轨道运动的。因

爱德蒙·哈雷

哈雷出生于1656年，是伦敦一位富商的儿子。他最初受的是私人教育，后来上了伦敦的圣保罗学校。1673年，他进入牛津的王后学院学习。1676年，尽管还很年轻，他仍然离开牛津，到非洲西海岸的圣赫勒拿岛观察南天球恒星。他是第一个这样做的天文学家（见本书第239页）。1678年，他被选入皇家学会。第二年，他在但泽拜访了海维留斯，以平息海维留斯和胡克关于在不使用望远镜的情况下对天体位置的测量是否有价值的争论。在17世纪80年代中叶，哈雷的交际手段得到了充分的发挥，当时牛顿在写作其《原理》一书，而胡克要求在书中写上引力思想是他的贡献，这使事情变得复杂起来，是哈雷耐心说服牛顿写完了这部书。尽管《原理》是献给皇家学会的，但出版费用却是哈雷支付的。

1696年，哈雷成了明彻斯特的执行审计官（Deputy Comptroller of the Mint at Chester）。1704年，他当选为牛津的萨维廉几何学教授。1720年，他接替弗拉姆斯提德（Flamsteed）成为皇家天文学家，在这个职位上他一直工作到1742年1月14日去世为止。



此，关键问题在于：太阳引力的平方反比定律能导致椭圆轨道吗？1684年1月，雷恩和爱德蒙·哈雷（Edmond Halley，约1656－1742年）在皇家学会就此展开了一场辩论。胡克宣称他已经证明了情况确实如此，但他不愿意将证据拿出来。雷恩太了解胡克了，知道他爱说大话，于是悬赏征求对这一问题的解答。不管是胡克还是别的什么人，只要他能在两个月之内拿出真实的证据证明这一点，奖金

就归他。这笔奖金最终无人认领。

在这一年的晚些时候，哈雷在剑桥会见了牛顿（1642－1727年）。当时牛顿是剑桥大学的教授。哈雷问他，在太阳的引力遵循平方反比定律的情况下，行星

反射式望远镜

在早期的天文望远镜中，光线首先通过一个玻璃透镜——物镜被会聚到焦点处，在焦点处它们进入目镜。这种望远镜是折射式望远镜。

在折射式望远镜中，要确定物镜理想的几何形状以及精确管长，必须面对许多实际困难。这些困难导致苏格兰数学家詹姆斯·格里高利（James Gregory，1638–1675年）于1663年提出了一种不同的设计。在他的设计中，光线通过一个管子射到底部中心有孔的凹面镜上，凹面镜把光线反射回管子，管子的中心安置着另一面小凹面镜，它把光线再反射回去。反射后的光线穿过第一面镜子上的小孔而进入目镜。

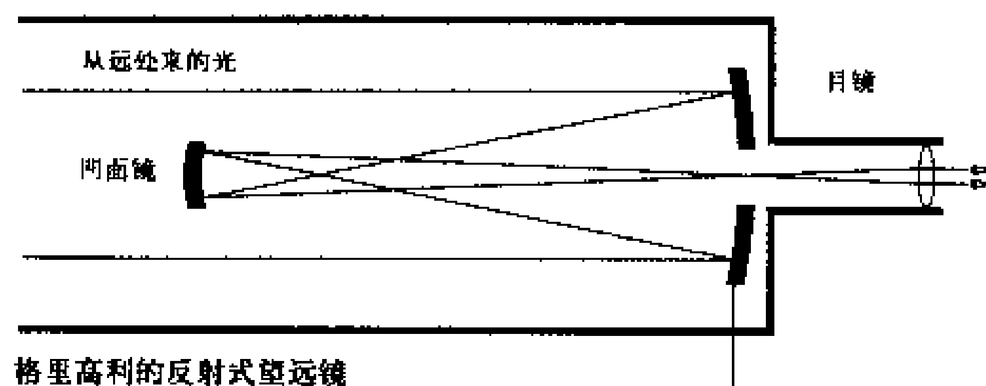
格里高利把他的设计提交给伦敦的一家光学公司，但那家公司只做了初步的测试，其测试至多对该设计的可行性提供了一些证明。

1672年，一个叫做卡塞格林（Cassegrain）的法国人提出一种类似的设计，不同的是，他把第二面小凹面镜换成了一个小凸面镜。对于卡塞格林的身世，至今我们一无所知。一个世纪后，人们发现，这个小凸面镜的引入，有利于避免格里高利设计中容易出现的“球面像差”。正因为如此，现代望远镜广泛采用了卡塞格林的设计。

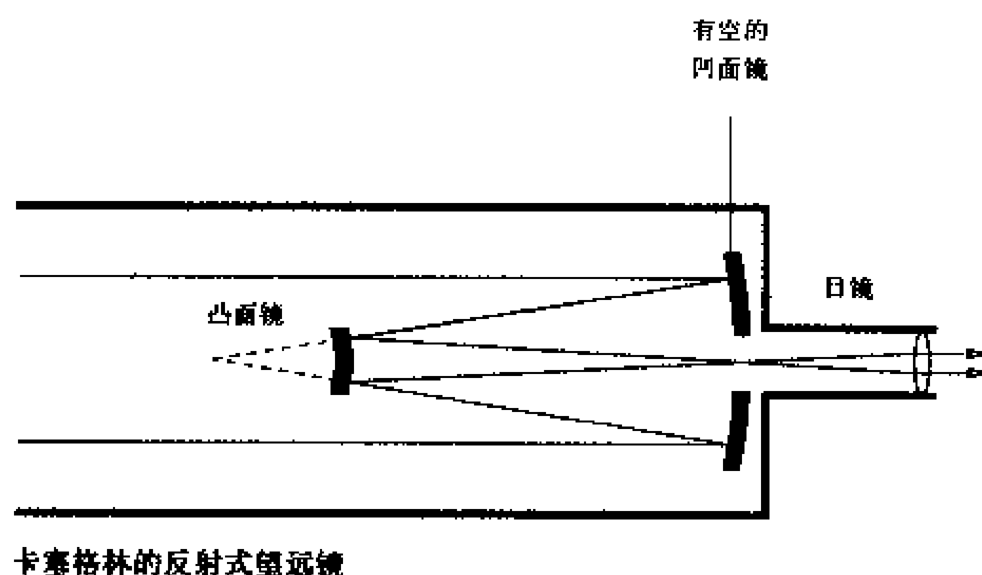
与此同时，剑桥的牛顿完成了一项至为重要的发现。长期以来，人们一直认为白光是简单的，色光是对白光的“修正”，但牛顿的发现表明，事实恰恰与之相反，白光是复杂的，它是色光的组合。对于给定的透镜，每一条色光的折射角都有轻微的不同。由此，牛顿认为，由这种“色差”所造成的成像模糊在折射式望远镜中是不可避免的。

格里高利用反射镜取代透镜，避免了这一问题，但遗憾的是，格里高利的设计取代的是第二面透镜，而最主要的镜子却仍然是透镜。

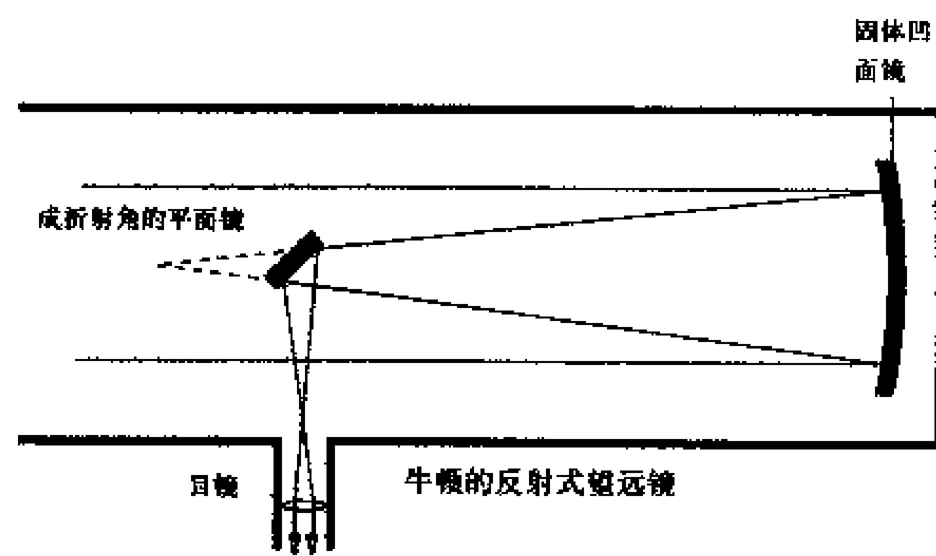
为了避免这些缺陷，1668年，牛顿自己动手制作了一架小型反射式望远镜。在他的设计中，管子的底部是一面镜子，用来反射入射光线。在管子的轴线上安装了一个小平面镜，镜面与轴线成45°角，可以把光线反射到安装在一旁的目镜那里。



格里高利的反射式望远镜

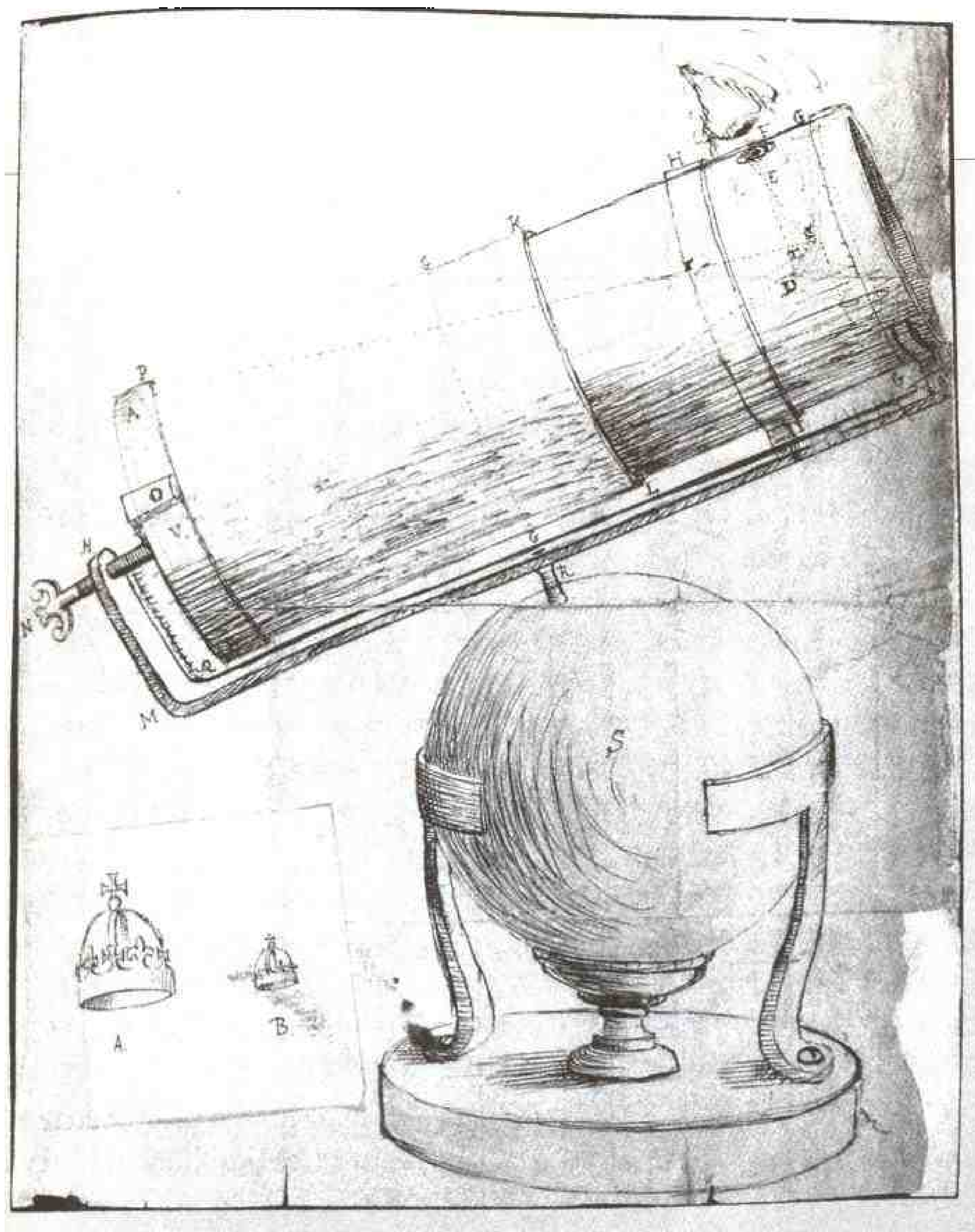


卡塞格林的反射式望远镜



牛顿的反射式望远镜

17世纪60年代和70年代发明的反射式望远镜，共有三种形式。在牛顿的设计中，主镜上不必再穿孔，而第二面镜子则是平面镜，不是曲面镜。这简化了望远镜的制造，因此这种形式的望远镜在18和19世纪变得很流行。特别是对装有大口径重镜的巨型望远镜而言，情况尤其如此。



1671年，皇家学会听说牛顿设计并制造了一架反射式望远镜，就要求去看看它究竟是什么样子。到了年底，皇家学会如愿以偿，见到了那架反射式望远镜。它立即给参观者留下了直接的印象。这是当时学会秘书给远在巴黎的惠更斯所绘的一幅图样。这两个王冠是同一个物体，装饰在300英尺远的风标上。左图是通过牛顿的反射式望远镜看到的图像，右图则是通过一个25英寸的折射式望远镜看到的图像。

这种反射式望远镜一开始只为牛顿在剑桥的少数朋友所知晓。到了1671年，他又造了一架，并把它献给了皇家学会。那两架望远镜现在已经失传，不过他于1671和1672年之间的那个冬天又制造了第三架，据信这一架的部分零件后来安装在了他1766年献给皇家学会的那一架上。

牛顿的反射式望远镜只需要一面曲面镜，制作相应简单，因此这种设计在18和19世纪被广泛的采用。特别是在研究微弱的星体，需要镜子有很大的"集光本领"的情况下尤其如此。

牛顿认为折射式望远镜不能解决色差问题，这一想法过于悲观。1729年，一位叫做霍尔（Chester Moor Hall，1703—1771年）的伦敦律师，通过把两种具有不同折射性质的镜片组合在一起，设计出了消色差透镜。这两种镜片一种是用燧石玻璃制作的凹面镜，另一种是用冕牌玻璃制作的凸透镜。不过霍尔没有把他的这一发明商品化，这使得伦敦仪器制造商的领袖约翰·多朗德（John Dollond，1706—1761年）在1758年给皇家学会的一篇论文中重新提出了这一想法，并申请了专利。从那以后，多朗德的"消色差望远镜（见本书第191页）就成了天文观测者和业余天文爱好者热购的对象了。

一幅1703年的雕刻。雕刻表现的是笛卡儿对太阳涡旋的设想。月亮被地球（图中编号为4）涡旋带动着绕地球运动，而地球涡旋作为一个整体又被太阳涡旋带动着。牛顿发现，在这种情况下对于月亮运动的动力学很难形成一个清晰的概念，对此，我们一点儿也不觉得奇怪。图中木星编号为6，它的周围雕刻着4个卫星，这些卫星是伽利略于1610年发现的。土星的编号为7，其周围有5个卫星，它们是惠更斯和卡西尼在1655年和1684年之间发现的。图中的太阳涡旋的四周充满了类似的体系，每一个都由在环绕着中心星球的轨道上运动的行星所组成。这一图景看上去多少有些不合适。

运动轨道会是什么样子？牛顿给出了哈雷几乎不敢指望得到的答案：其轨道是椭圆。

椭圆轨道的动力学

当牛顿于1661年进入剑桥时，剑桥在其法定的教学内容中信奉的仍然是亚里士多德的学说。但学院的导师们却处于半独立状态，他们为介绍非官方的笛卡儿物理学大开绿灯，同时介绍给学生的还有笛卡儿的机械论哲学——物质的运动是解释万物的根本，一个物体只有接触别的物体才能对其施加影响。

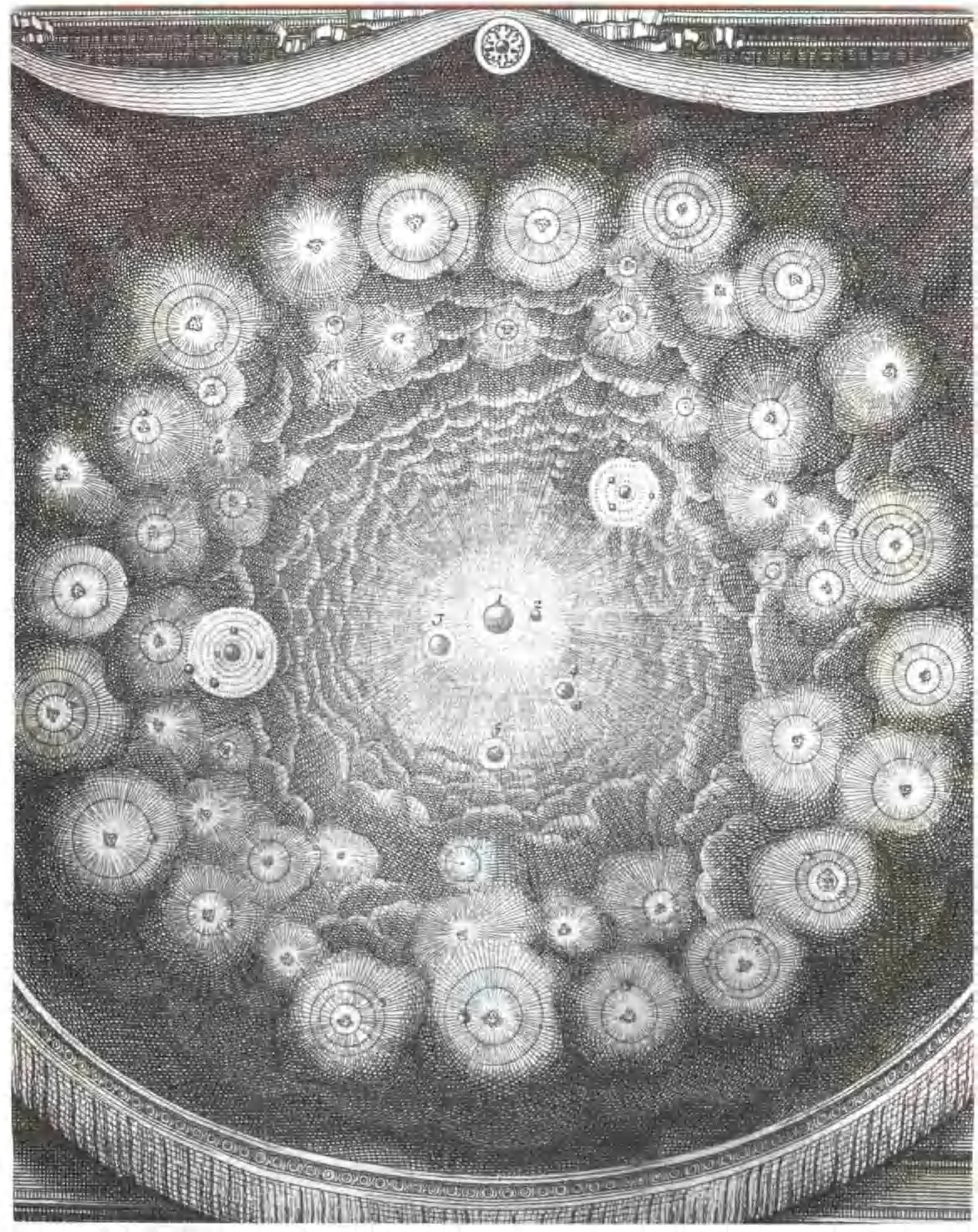
笛卡儿认为，所谓的真空，是一种自相矛盾的说法。在他心目中的宇宙里，地球和行星是在太阳系巨大的涡旋中做圆周运动的，同时地球又是一个小一些的涡旋中心，地球涡旋携带着月亮做圆周运动。因此月亮同时卷入了太阳和地球的两个涡旋之中。这种描述为研究者提供了一种不确定的图景。

相比之下，学者们对抽象的圆周运动概念所做的分析倒是直截了当的。到了17世纪60年代中期，年轻的牛顿独立地得出了与惠更斯相同的向外的引力公式。但在此之后，他的进展缓慢且不确定。一个障碍横亘在开普勒第二定律所面对的圆周轨道变化的面前：从观测角度来看，这些变化尽管小到彼此几乎不可分辨，但从概念上说，其差别意义深远。正因为如此，出现了大量对该定律类似的描述。在1665－1679年之间，牛顿致力于对这些描述的研究之中。他的研究富有成效，最终他超越了人们公开描述的该定律的面积形式。

到了1679年，牛顿在行星动力学方面依然是一个笛卡儿主义者，依然在为搞清楚太阳涡旋内部复杂的相互作用而奋斗，依然被那种向内的和向外的引力所困惑。就在这年的11月，他收到了胡克的一封信。过去，他跟胡克在光本性问题上发生过冲突。现在，胡克是皇家学会的秘书，他给牛顿写信的目的是要拉这位性格容易冲动的天才参加学会的活动。在信中，胡克邀请牛顿思考“行星在受切向运动（惯性运动）和向心运动的综合作用之下，其在空间的直接运动会是什么样的情形”这一问题。牛顿曾经想到，轨道运动是相反的力相互作用的结果，而胡克则视其为一个力，认为是该力使得本来倾向于沿直线运动的物体反过来沿曲线运动。

牛顿面临着的是纯粹的科学挑战，这场挑战激发了他的兴趣。他的反应是设想从离开地球表面一定高度处抛下一个物体，分析当这个高度达到多大时该物体刚好能落至地球表面，以及分析如果地球上面没有阻力或地球的引力自始至终是一个常量，那么该物体将如何保持持续不断的运动。在这些分析中，牛顿弄出了一个小差错，但这个差错很快就被胡克指出来了。对于牛顿来说，没有什么比被证明有错更让他耿耿于怀的了。然而，胡克很快就对继续探索这种恒定的引力感到厌倦了，他觉得那只不过是数学家的游戏，而他认为自己是一个纯粹的物理学家：“我的推测是引力总是与距中心的距离的倒数之比成比例”，换言之，即平方反比定律。

无论如何，到了此时，牛顿所捍卫的那些机理已经荡然无存，牛顿只好闭口无言。但是，他却解决了胡克给他出的难题。对此，胡克一无所知。牛顿的答案



是：行星将绕中心物体沿着椭圆轨道运动，中心物体在椭圆的一个焦点上。这一结果与开普勒第一定律所描述的行星运动完全相合。

万有引力

实际上，牛顿的进展还要更大。牛顿想到，只要胡克对行星轨道的分析是正确的，他就有理由认为由太阳发出的平方反比引力所导致的行星轨道不但遵守开普勒的第一和第二定律，而且毫无疑问也遵守其第三定律。

胡克认为引力是在太阳和行星之间产生作用的，有时这种作用也存在于太阳和彗星之间——但并非总是如此。的确，在其新作《彗星》一书中，他还提到形成彗星的物质或许会由于其内部的"混杂"而失去引力。彗星轨道问题一直为数学家所头疼，因为他们很难通过在地球上的观测为彗星确定一个三维路径。这件事情非常困难，以至于牛顿后来为完成《原理》一书，专门花了好几个月的时间来解决该难题。无论如何，人们总能看到彗星在天空大致是沿着一些"大圆"（以观测者为圆心）上的弧段前进的。一般认为，彗星走的是直线，而那些弧段是其轨道在天球上的投影。学者们指出，当彗星出现后并指向太阳系时，它沿直线加速前进，当它经过太阳时，它绕出了一个小弧线，然后继续沿直线前进，减速离开太阳系。

但是，最近在格林威治被任命为皇家天文学家的约翰·弗拉姆斯提德，却是几位持有不同意见的天文学家之一。1680年11月，人们观察到了一颗指向太阳的彗星，而在这年的10月，人们首先观察到了沿着完全相反的方向背离太阳而去的彗星。弗拉姆斯提德认为它们不是两颗不同的彗星，而是同一颗。为了说明其相反的方向，他的解释是说当彗星在太阳引力作用下向内运行的时候，太阳的涡旋把它甩离了原来的路线，最终彗星自己找到了新的与太阳的磁联系方式，即受到其排斥，结果是彗星在抵达太阳之前被驱离了太阳。

弗拉姆斯提德不厌其烦地把他的理论告诉了牛顿，并把他赖以建立其理论的观测数据也一道告诉了牛顿。在随后两个人交换意见的过程中，牛顿的头脑中浮现出了另一种想法，他认为彗星"进入了绕太阳的轨道"——它从太阳的背后绕过去了。在彗星是否受到太阳的按平方反比定律分布的引力的作用这一问题上，他也许曾经十分困惑。是否这颗彗星可以作为一个例证，证明彗星轨道与行星轨道在原理上别无二致？然而，事实上他最后得出的结论是这一证据别有含义。

关于牛顿在1679和1680年之间的那个冬天与胡克交换意见过程中以及哈雷于1684年登门拜访他这段时间里其思想是如何发展的，我们知之甚少。哈雷的拜访重新唤起了牛顿对行星轨道动力学的兴趣。哈雷向牛顿提了一个问题：如果太阳对行星的引力与它们之间距离的平方成反比，行星运动轨道应该用什么曲线来描述？牛顿向这位年轻的善解人意的哈雷揭开了他曾向其论敌胡克隐瞒的秘密：这种曲线应该是椭圆。

牛顿的回答完全出乎哈雷的意料，他惊讶得瞠目结舌。我们不难想象，他一定是过了好半天才回过神来。当哈雷定下心来之后，他要求立刻看看牛顿的推导过程。牛顿一下子拿不出来，但答应回头送给他。

《原理》的写作

哈雷收到的是一份只有9页纸的论文手稿，其中大部分谈论的是物体在虚空中的运动。其中的一个“假说”是对惯性定律的描述：“任何物体，除非受到外界的推动，除非其原有的力在其运动过程中始终如一地一直作用下去，它将沿无限长的直线运动。”该假说在表述过程中使用了无限长的直线这一术语，而这样的概念在开普勒和伽利略那种封闭的、有限的宇宙中是不可想象的。

牛顿证明了——或者说我们认为他证明了——一系列与开普勒定律有关的命题，也可以说是推导出了这些命题：如果一个物体在中心引力作用下运动，它将遵守面积定律；如果引力遵守平方反比规则，该物体的轨道将是圆锥曲线（很可能是椭圆）；反之如果物体运动轨道是圆锥曲线，则其所受作用力遵循平方反比规则；如果物体沿椭圆轨道运动，并且引力指向其焦点，那么这些轨道将遵循开普勒第三定律，反之亦然。

牛顿从力学角度得出的这些抽象结果可以应用于太阳系，从而得出太阳系天体运动的真实规律：“因此，大部分行星轨道是椭圆，椭圆的一个焦点在太阳的中心（开普勒第一定律），从太阳到行星的矢径所扫过的面积与时间成正比（第二定律），与开普勒所想象的完全一样。”直到这个时候为止，人们对过去开普勒对行星运动所做的概括（即开普勒三定律）的可信度才不再怀疑。

我们注意到行星轨道的焦点“在太阳的中心”这一说法，它表明牛顿仍然认为是太阳对行星施加引力而行星是被吸引的。它也表明，尽管到了此时，牛顿依然需要去领悟胡克在1674年曾表述过的他的第一假说：天体之间的作用是相互的——尽管这一表述还不够完备。

这种情形多少有些令人惊奇。在其手稿当中，牛顿已经表明开普勒第三定律也适用于伽利略所发现的木星的卫星，适用于土星的卫星（包括惠更斯于1655年发现的土卫六，以及巴黎的大多米尼科·卡西尼最近发现的另外四颗）。这些卫星显然受到了它们所围绕的行星的平方反比引力的作用。如果土星吸引土卫六，它为什么不吸引太阳呢？

在完成了修订手稿工作后的几周里，牛顿在认识上实现了关键性的跨越：天体的确相互吸引。这一认识使他走上了发现万有引力之路。总的说来，现在的情况是：混乱在一定程度上让位于清晰，物理学史上翻开了新的一页。但即使牛顿本人，作为一个不幸的调查者，面对这种复杂局面也被惊呆了。天空有这么多的天体，它们彼此相互吸引，谁有能力去解开其中所涉及的大量力学问题：“如果我没有弄错的话，要同时考虑所有这些导致运动的原因，要用精确的定律通过简单的计算去定义这些运动，这超过了任何一个人的思维能力。”

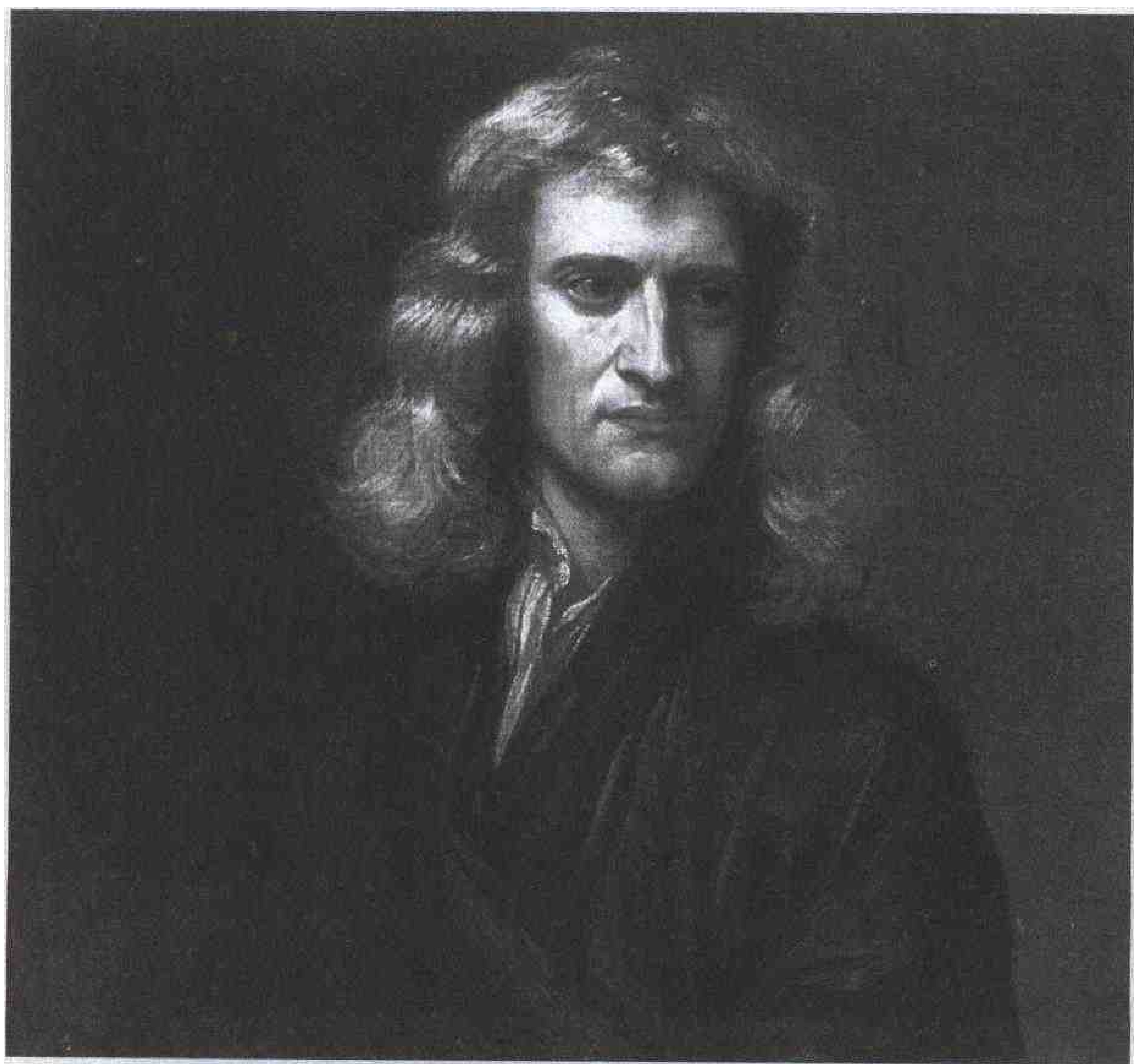
再没有比最近发生在牛顿世界图景里的变化更富有戏剧性的了。在17世纪80年代开始的时候，他的世界是一个混乱的笛卡儿空间，里面充满了物质，所有的物体都受到其相邻物体无休止的作用。而到了这个年代的中期，他的世界几乎成了虚空。虚空里存在着一个个分离的物体，每个分离物体在别的分离物体的引力作用之下，离开向前的轨道，在其周围的虚空中运动。

哈雷毫不费劲就认识到了牛顿这些工作的革命性意义。他开始耐心地劝说牛顿出版他的著作。他知道牛顿是一个爱挑剔的人、是一个必须极其细心地与之打

伊萨克·牛顿

牛顿于旧历1642年12月25日出生于英国林肯郡的韦尔索普（woolsthorpe），他于1661年进入剑桥的三一学院，但并未取得正式学籍。1665到1666年之间，因为当地瘟疫的缘故剑桥大学放了长假，这个时期正好成了牛顿智力创造的异常高峰期，在这期间他大部分时间一个人在家里闷头苦干，为他未来在光学、数学和动力学方面的成就奠定了基础。

1667年，牛顿成了三一学院的研究人员，两年后，他接替了伊萨克·巴罗的卢卡斯数学教授职位。牛顿曾热衷于用"科学"的方法研究炼金术和《圣经》年代学。在1687年他的《原理》出版之后，牛顿开始寻求其学术之外的生活。1696年，他被任命为伦敦造币厂的厂长（后来又被任命为大臣）。他花全力管理当时刚刚开始的重铸货币工作。在他余下的岁月中，他一门心思扑在造币厂的事务上。1701年，他辞去了在剑桥的所有职务。1703年，他被选举为皇家学会的主席，他执掌皇家学会的权杖一直到1727年3月20日他去世时为止。



交道的人。牛顿也是一个追求完美成癖的人，是一个很少认为自己的著作在现有状况下已经达到出版水平的作者。同时他也越来越被自己手头的工作所迷住，计划要写的论文越来越多。

他的努力获得的成果之一是彗星理论——甚至在写他的第一份手稿之前，他就修改了他对1680年那颗彗星的解说。他现在认为那颗彗星确实“进入了太阳的范围”。他相信彗星遵循平方反比定律。他指出，彗星如同行星一样，其轨道就像法律所规定了的那样精确。在解决了有关的数学问题之后，人们也许可以“确定同一颗彗星究竟是否按一定的频率回归到我们的面前”。牛顿的研究导致了《原理》的一个命题，该命题宣告说，彗星沿圆锥曲线运行，这种圆锥曲线很可能是椭圆——但并不一定是椭圆，太阳位于其焦点之上（开普勒第一定律的推广），彗星与太阳的连线在相等的时间内扫过相等的面积（第二定律）。

胡克在其1674年的第一“假说”中，认为地球作用于遥远的别处天体上的引力与它作用在几码远的下落的石块上的引力是一回事。现在，牛顿也有了同样的想法。这种遵循平方反比规律的引力对大小不同的物体能够同样吸引吗？具体地说，地球能够像吸引月亮那样去吸引一块小石子吗？

牛顿坚信引力的平方反比定律是正确的，就跟他未来的读者坚信他是正确的一样。尽管如此，在他能够去解答引力的统一性这一问题之前，他对于该定律的信仰首先经受了考验。假设有两个相同的物块，它们离开一粒石子（或者月亮）同样的距离，但这两个物块一个位于地球中心，另一个则位于地球表面，人们能否很认真地坚持说它们对于那粒石子（或者月亮）的引力大小完全一样吗？的确，在

牛顿对“异动现象”的解释

在其《原理》一书中，牛顿对第谷发现的月亮运行的“异动现象”做了解释：在一级近似的情况下，月－地系统的引力中心绕太阳运动的轨迹是椭圆，而地球和月亮又分别绕着这个引力中心作椭圆运动。两个椭圆相对，地球所在的椭圆小于月亮所在的椭圆。但是太阳的介入打乱了这一简单的图景，如果它们距太阳的远近不同，太阳作用于它们上面的引力大小也就不同；当它们的位置对太阳形成一个角度时，太阳对它们的引力的方向也不同。这些影响与地球对月亮的引力同时存在，彼此相互叠加，最终影响了月亮的运行状态。

具体地说，在每月的新月和满月的前后，这种叠加的结果是减弱了地球对月亮的引力；而在每月的上下弦前后，叠加的结果则加强了地球对月亮的引力。当月亮从上下弦月变到满月或新月时，月亮运动的线速度增加，反之当它从新月或满月变到上下弦月时，月亮的线速度减小。这样，月亮的视角位置每月经历4次异动，这些异动相互成45度的角——正如第谷所发现的那样。

由于该月－地系统在其椭圆轨道里每年绕太阳旋转一周，它与太阳的距离当然要发生变化。当该系统接近太阳时，它所受太阳的引力比通常要强，这会减弱地球对月亮的影响。而当这个系统离太阳的距离变远时，则引起相反的效应。这就导致了第谷所发现的那种月亮运行的周年不规则现象。

物块位于地球内部的情况下，它周围的那些岩石不就是屏蔽物吗？这些屏蔽物难道不会减小该物块对外的引力？对于牛顿后来的门徒来说，这些反对意见是如此之强大，以至于他们不得不宣布说，既然引力只与距离有关，中间的障碍物无论如何对它也不起作用，那么引力一定是直接由上帝所确定的。

虽然引力变化精确地与距离平方成反比的学说得到了人们的赞成，但牛顿要想把该学说成功地应用于月球，还必须克服一些数学上的障碍：地球对一个下落石块的引力是其无数的小组元对该石块的引力之和。而组成地球的这些小组元有些离该石块只有几码远，有些则有几千英里远，如何才能把这些远近相差悬殊的各个小组元所产生的作用方向各不相同的引力叠加起来呢？牛顿成功地证明了一个非常有价值的原理：对于一个均匀球体（地球就近似于这样一个球体），其总引力的大小等同于所有物质集中于球心时所产生的对外的引力。因此，整个地球作用在地表面附近自由下落的石块上的引力，精确地等效于地球所有物质集中于其球心时对该石块所产生的引力。

牛顿在数学上的这一突破使得他能够把地球对石块的引力（距离等于地球半径）与其对月球的引力（距离为地球半径的60倍）加以比较。地球对石块的引力导致了石块自由下落时的加速度，同样，地球对月球的引力也导致了月球的“下落”，即导致月球脱离直线运动而进入绕地轨道。牛顿的计算表明，地球对石块的引力与对月球的引力之比确实为约 $1:60^2$。牛顿的发现是对亚里士多德天地有别说教的最后一击：开普勒的行星和伽利略研究过的自由下落石块在同一力学定律的支配下运动。

随着牛顿的著作日渐成熟，他所观察到的引力作用的例子也随之增加。例如，他最先对潮汐现象做出了令人满意的解释，说明了潮汐是如何产生于坚固的地球和流动的海洋所受到的月球和太阳引力作用的差异。他还指出，由于旋转的结果，地球的赤道部分会稍微凸起一些，而两极则稍微平坦一些。又由于这种非正球效应，月球和太阳的引力将会使得地球像小孩玩的陀螺那样摆动，从而导致希帕恰斯早在古代就发现了的二分点的移动现象（见第35页）。

由于月球距地球观测者很近，人们可以对它那复杂运动做独一无二的具体研究；由于月球的质量比同类星球（例如木星的那些卫星）要大得多，它与地球之间相互作用力的变化就格外复杂。的确，在18世纪，月球成了检验牛顿力学的一个试验场：引力定律能够不但定性地而且定量地解释月球偏离其平均轨道的那些行为吗？

例如，第谷即曾发现，当考虑到别的一些因素时，月球绕天空运动（沿黄经方向）的速度就会出现一些额外的变动，这样所导致的偏离平均路径的正负移位的最大值共有四个，其位置分别相应于上下弦月以及新月或满月时。他也发现月亮沿经度方向的位置变动有一种周年不规则性，这种不规则性高达11弧分。

牛顿对月亮运动的这种异动以及别的不规则现象做了定性解释，其解释被收入《原理》的第一册。在《原理》的第三册以及别处，他试图对此做进一步的定量解释，但他的努力只取得了部分成功。确实，《原理》标志着天文学史上一个时代的结束，但它同时也是一个时代的开始，它还得为“天体力学”未来几十年的

发展留下余地。

引力定律使得牛顿可以用一种新的视角看待行星系统。从围绕着地球、木星、土星这些行星的卫星的向心加速度出发，牛顿能够计算出影响其向心加速度大小的重要因素——围绕着它们的卫星的质量。从计算的结果来看，地球的质量比木星和土星的还要小。有理由想象其余3颗行星（见第175页）的质量也很小。在这种情况下，行星间引力相互作用的主要例子就是既大又重的木星和土星之间的相互作用。长期以来，天文学家们的确难以将开普勒式的理论应用于木星和土星，这里有着令他们头疼的难题，而其本质直到差不多一个世纪后，到了牛顿这里才得以澄清。

牛顿认为，宇宙是稳定和像时钟一样精确的，这种构造是上帝的深谋远虑，太阳系有条不紊的布局就证明了这一点。在太阳系中，行星轨道在行星连线方向几乎平行排列，所有行星沿同一方向运行，两个既大又重（具有潜在的瓦解可能）的行星被安排在外围。然而他认为即使这种程度的安排也仍然不能永远阻止太阳系的解体。为了避免这样的灾难，上帝一定进行了一次又一次的干预，以修复那些会导致最终崩溃的紊乱。对于那些能够读"自然之书"的人来说，这将是上帝如何关注其创造物的一个例证。这样的例证在后面我们讨论牛顿的恒星宇宙模型时还会遇到。

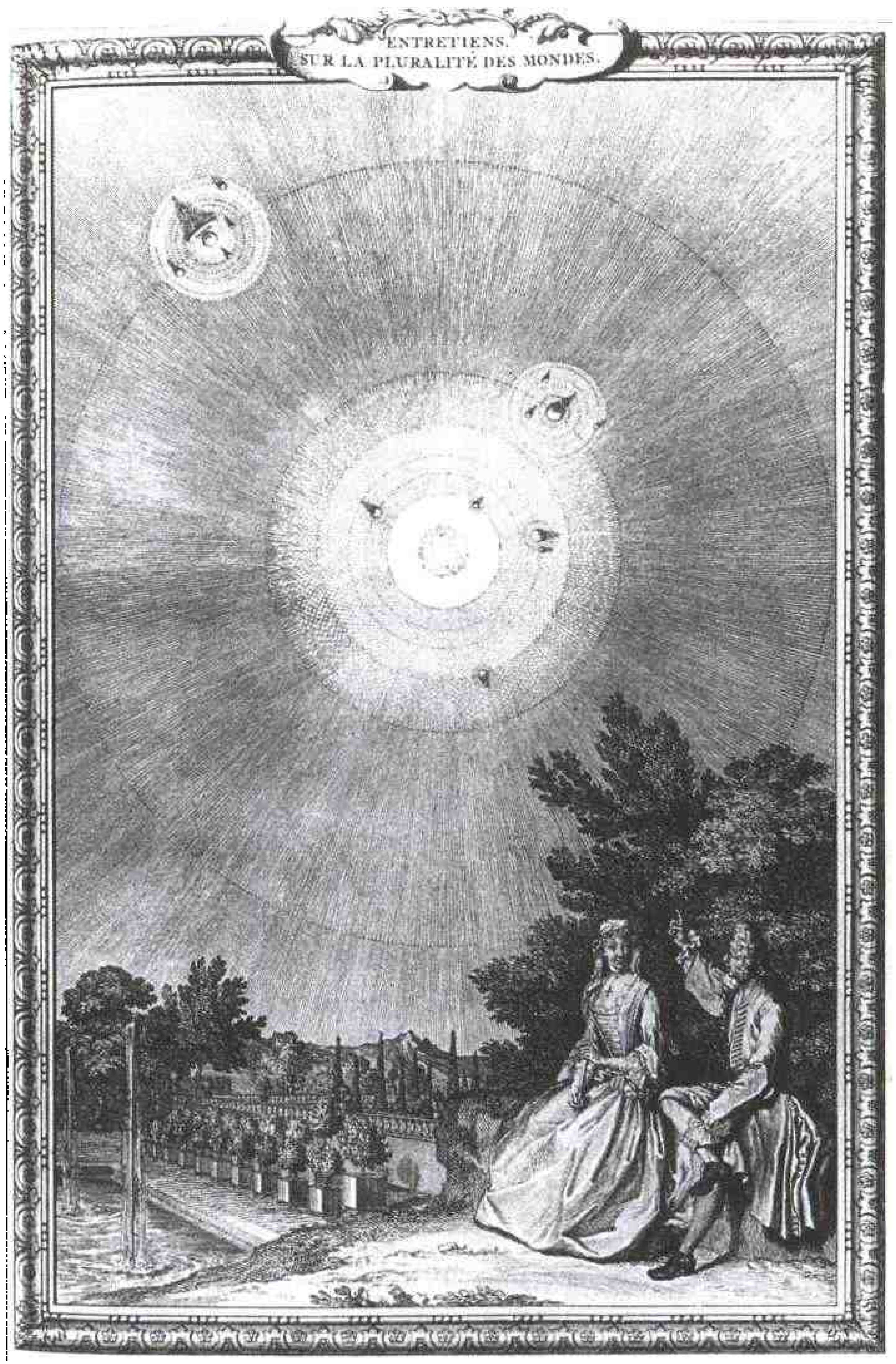
与此同时，随着牛顿为回应哈雷热切鼓励而写的著作日渐成形，胡克想到一件事：这种令人感到石破天惊的概念中的要素早已在他的著作中公之于世。事实上也确实如此。胡克因此要求在牛顿未来的出版物中明确指出这一点。

把胡克的要求转告给牛顿的这一难题又落到了哈雷的头上。牛顿的至交好友甚少，胡克并非其中一员。在牛顿看来，胡克是一个低能的数学家，在科学上又是一个糟糕的哲学家，对于缺乏事实支持的假说和经过充分证明的数学理论——在这种理论中假说是用来解释大量自然现象的——之间的差异毫无鉴别能力。哈雷使尽浑身解数调解他们的争端，在经历了长时间令人心力交瘁的劝说之后，终于结束了这场危机。然而，当牛顿后来改写他原准备名之为"世界体系"的那一节时，他充实了而不是替换掉了一些材料，那些材料从其数学水平而言，是胡克写不出来甚至是无法理解的。

《原理》的影响

牛顿的《原理》问世于1687年。其书的全称是《自然哲学的数学原理》(Mathematical Principles of Natural Philosophy)，这一名称显然是对人们通常认可的自然观念的挑战。这些观念在笛卡儿体系的教科书《哲学原理》中具体化了。在内容上，这两本书是尖锐对立的。在笛卡儿进行含混不清的表述的地方，牛顿给出了精确的数学论断；在笛卡儿满足于进行定性解释的地方，牛顿的几何学则为定量的预测开辟了道路。

然而，笛卡儿对世界的看法在其可理解性方面有巨大的优点：在笛卡儿的宇宙里，一个物体只有与别的物体直接接触，才能够受到影响。笛卡儿曾经提醒自



笛卡儿物理学在时髦的法兰西社会非常流行。这是1686年出版的丰特列尔(Bernard de Fontenelle)的《关于多元世界的对话》(Conversations on the Plurality of Worlds)一书中，作者与德·G·侯爵夫人连续几晚的谈话。他向她讲述了托勒密体系、哥白尼体系、以及第谷·布拉赫体系，讲述了行星、行星的卫星以及恒星，还讨论了这些"外星球"是否有人居住的问题。

然哲学家们要拒绝"倾向"、"欲望"、"吸引力"之类的词，认为这些词会帮助人们隐瞒自己的无知。因此，对于笛卡儿学派的人来说，牛顿的"吸引力"概念是对上述信念的大倒退。牛顿本人曾数次试图阐明引力的物理原因，但未能如愿。他只能坚持说这种力一定是真实的，因为它引起的结果是有案可稽的。这种说法就

方法论而言是机智的，但并非每个人都能接收。

对于牛顿主义者来说，另一个问题产生于牛顿所用的那种陈旧的几何学。《原理》中的数学使得它的论证只有极少数人能够理解。1697年，一位年轻人进谒了牛顿在剑桥的教授职位代理人威廉·惠斯顿（William Whiston，1667–1752年），他转告的事情使惠斯顿在道德上陷入了进退两难的窘境：惠斯顿在大学时的导师是一位笛卡儿的狂热信徒，他要求惠斯顿准备一套新的拉丁文版的笛卡儿物理学经典教材——杰克·罗奥（Jacques Rohault）的《论物理学》（Treatise of Physics）。从道德角度而言，以这种方式使一种虚假的物理学得以保存下来，这是否可取？惠斯顿最后答复说，由于牛顿的著作至今还令人难以理解，也由于笛卡儿物理学是对其前的亚里士多德学说的巨大改进，这位学生——萨莫尔·克拉克（Samuel Clarke，1675–1729年）——可以依靠自己的良知做出判断。

在这一事件中，克拉克在其后来的译本中，通过编辑脚注的方式使他的踌躇心理得以减轻，这些脚注与教材中笛卡儿学说的主旨展开了一场持久战。他毫不犹豫地拒绝了罗奥的说教，而在其长长的注解中代之以牛顿的解释。就这样，通过这种迂回的方式，学生们逐渐熟悉了牛顿学说的基本要素。

对于牛顿的追随者而言，牛顿是人类绝无仅有的天才人物，是一位在历史上天赋重任、要为人类揭示宇宙基本真理的巨人。英国诗人亚历山大·波普（Alexander Pope）这样赞美他说：

> 自然和自然规律隐藏在黑暗之中，
> 上帝说，让牛顿去吧！于是到处充满光明。

牛顿的观点一旦被接受，剩下来的事也就清楚了：从数学上证明天体所有的可见运动都是引力作用的结果。

但是即使是那些支持牛顿、认为引力概念在物理学上有其确实依据的人们，要在关于自然的两大哲学派别之间做出选择，也绝非轻而易举；而对折中方案的排除，更不是显而易见之事。笛卡儿学说本身并不做定量预测，所以很难出现它与牛顿学说同时对某一事情进行定量阐释，两种矛盾的解说并存，可以用实验方法对之加以裁决的例子。在这种情况下，要在这两种学说之间进行直接选择就更困难了。然而，出乎人们意料的是，在关于地球形状的讨论中，却存在着一个这样的例子。

牛顿理论与笛卡儿学说关于地球形状的争辩

从古代开始，每一个受过教育的人都知道大地近似于一个圆球（见本书第25–26页）；哥伦布（Christopher Columbus）完全知道大地没有边缘，他的航船不会在所谓的边缘处摔落下去；从公元前3世纪埃拉托色尼完成了他那划时代的工作之后，人们对于地球的大小也有了大致了解。但是没有人能够精确说出地球的形状到底是什么样子。要准确揭示地球的形状，需要有一个组织，这个组织有充足的经费支持、能够吸引到必要的天才，而且还要能够满足所涉及的各种巨额花费。

用望远镜进行测量

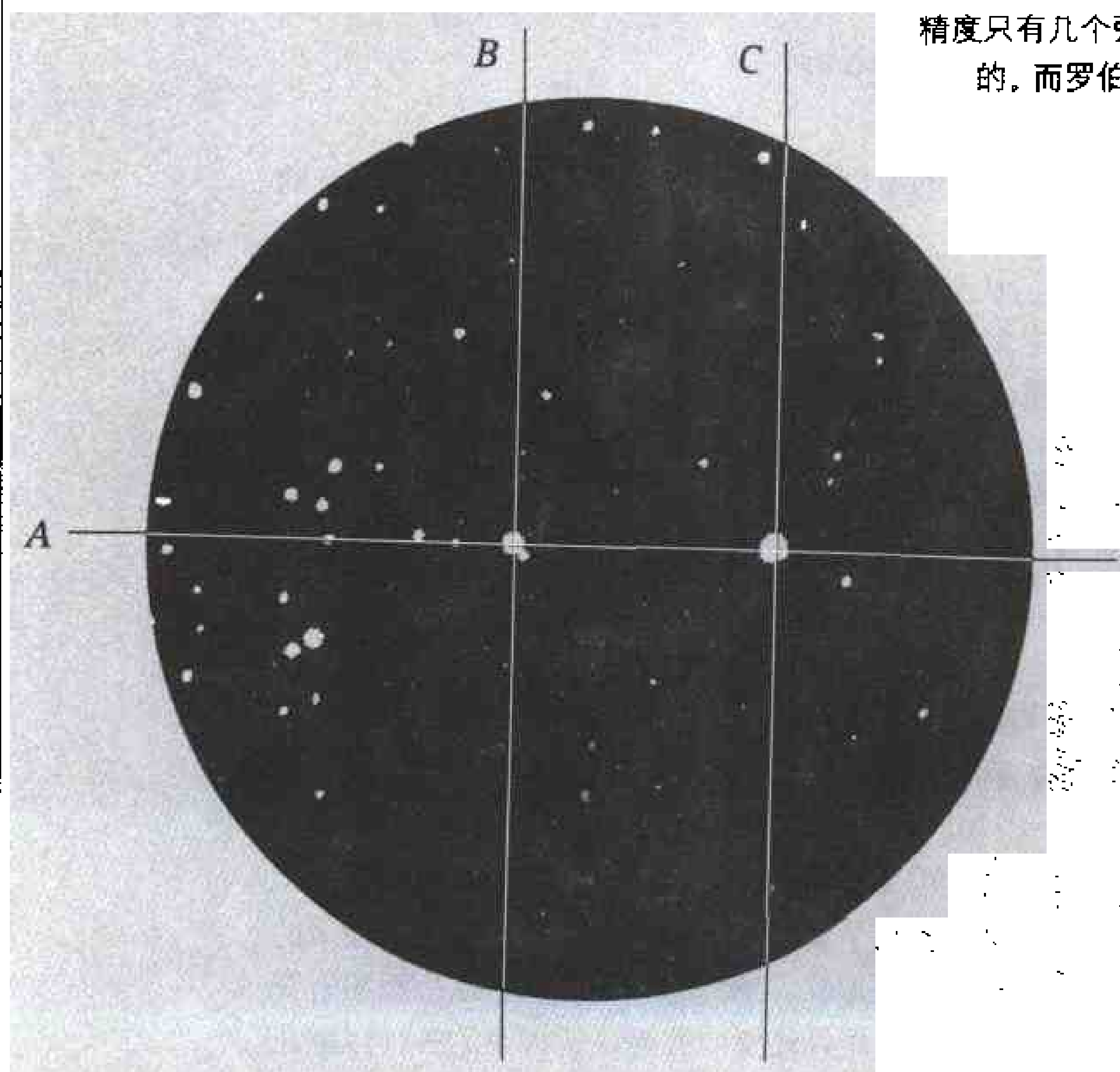
望远镜使得观测者可以看到新的物体，使那些熟悉的物体看上去变得更大。另一方面，传统的天文学仪器则是用来测量角度的。这两种仪器能够结合在一起，是人们始料未及的。

在开普勒设计的那种望远镜中，像被会聚在焦点之上，观测者通过目镜来看。这种望远镜是被作为显微镜来使用的。大约在1640年，英国一位叫做威廉·盖斯科因（William Gascoigne）的业余天文爱好者发现一只蜘蛛在他的望远镜的焦面上结了一个网，观测时，这张网就附加在该望远镜所成的天文图像上。盖斯科因由此意识到可以在该平面上装上十字发丝，以此精确确定视场中心，使望远镜精确校正到目标物上。另一方面，也可以安装上测量装置即"测微计"，用其测量行星之类天体的宽度，或者是相邻物体——例如月亮上的两座山头——所张开的角度。

不幸的是，盖斯科因于1644年在英国的那场内战中被杀死。但是他的技术于17世纪50年代在牛津被采用了，值得注意的是克里斯托弗·雷恩使用测微计搜索了月亮。到了1663年，雷恩又在皇家学会演示了装有望远镜的天文仪器。

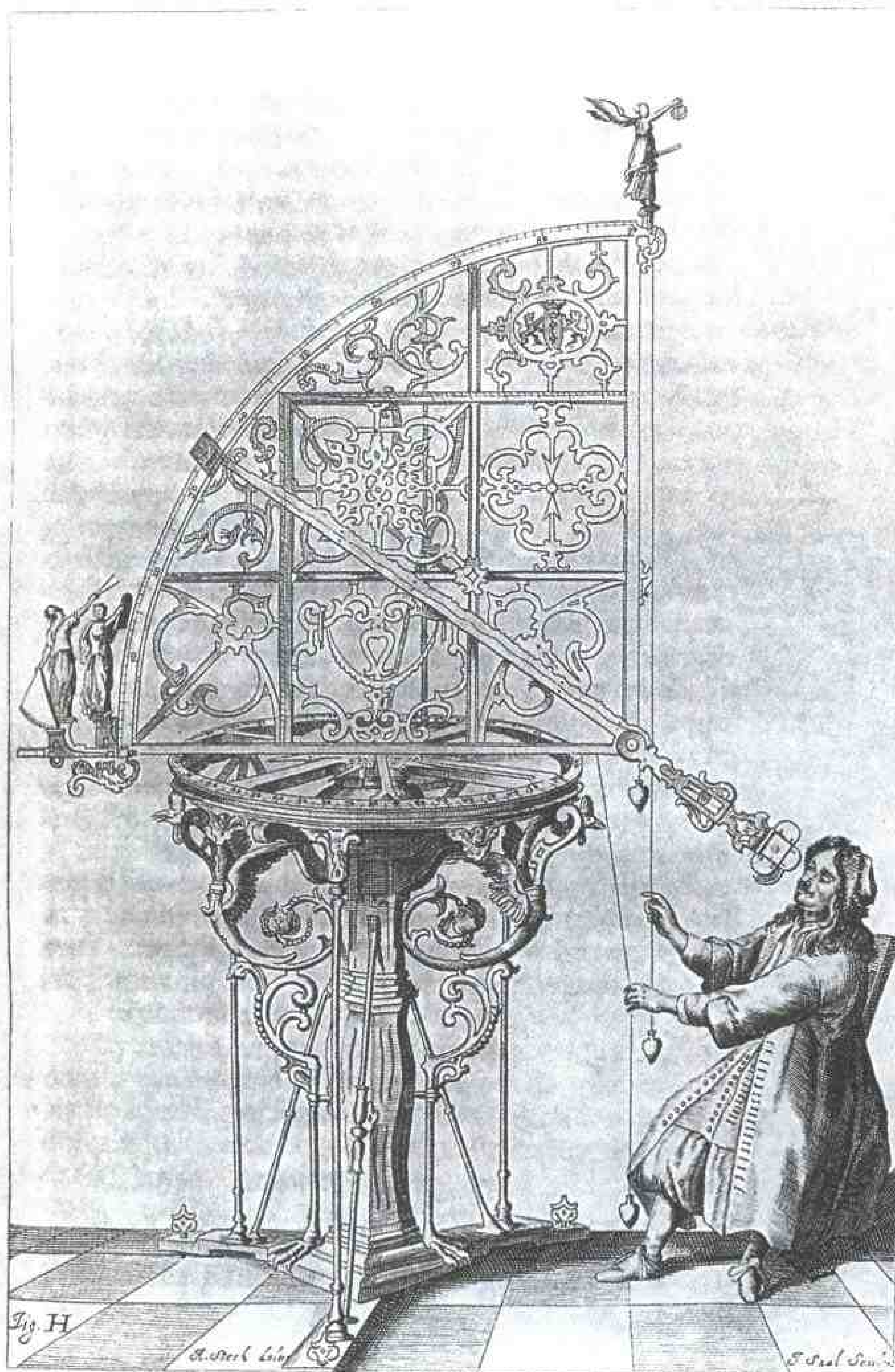
与此同时，克里斯蒂安·惠更斯在其《土星体系》(Systema Saturnium)中公布了他于1659年独立发现的一种目镜测微计。埃德林·奥宙特（Adrien Auzout）、彼埃尔·皮特（Pierre Petit）和简·皮卡德（Jean Picard）等人则于17世纪60年代在巴黎研制出了其他形式的测微计。在学者们的努力之下，不久人们就实现了由望远镜向测量仪器的过渡。

但是，把望远镜安装到传统的测量仪器上去，以改进裸眼的图形分辨率的进程后来变慢了。约翰尼斯·海维留斯坚持在测量天体位置时不用望远镜，他宣称他的传统仪器所达到的精度只有几个弧秒，其精度是前所未有的。而罗伯特·胡克一意孤行，拒绝



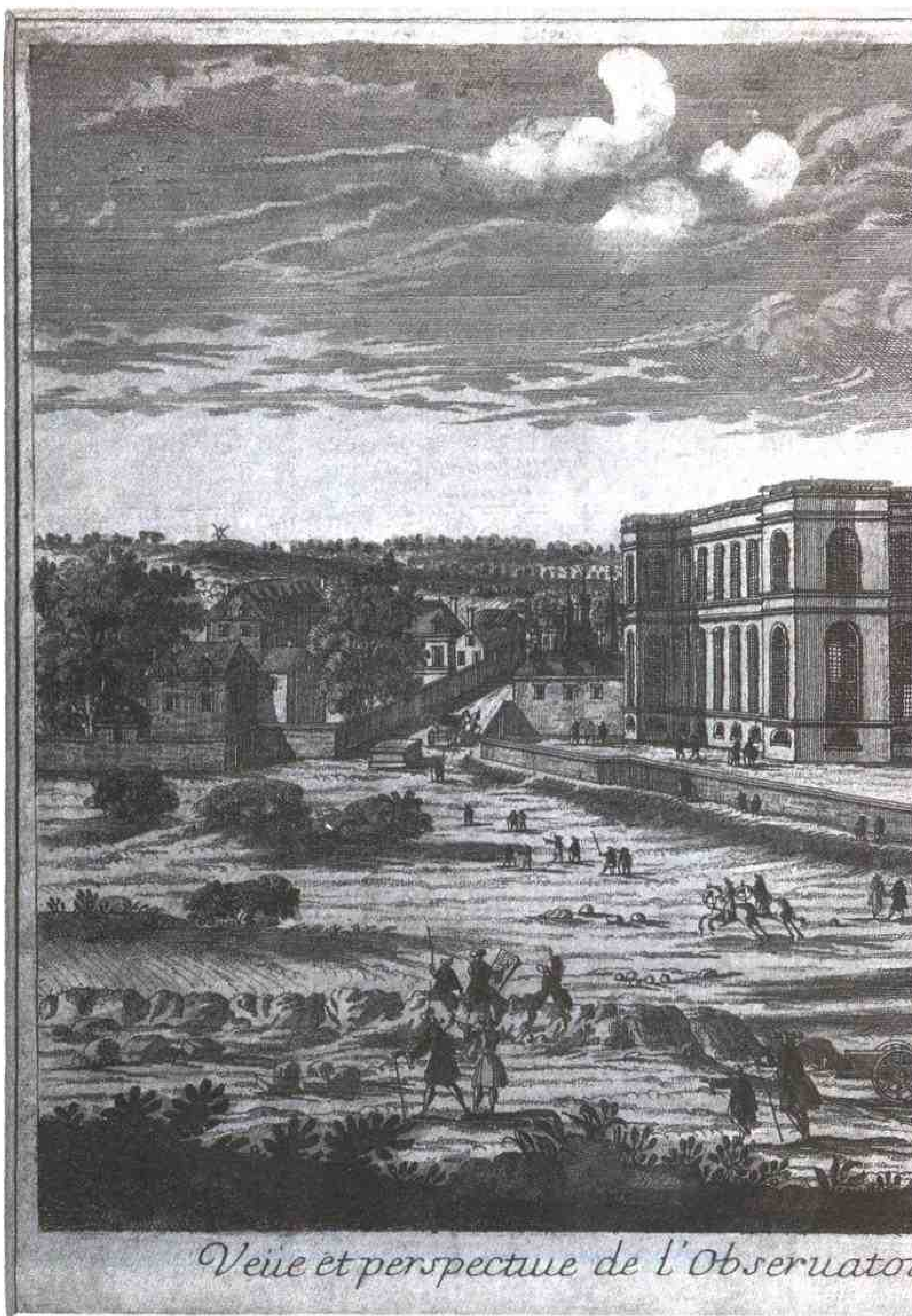
线测微计原理。在测量两颗恒星所张角度时，观测者首先调整测微计，使定线A同时经过这两颗恒星，然后移动动线B和C，使其分别经过其中的一颗。B和C移动到相应位置时其间距就是这两颗恒星所张的角度。

采纳先进技术.他对采用新技术测天毫无耐心.从而浪费了宝贵的时间和资源。反对在天文仪器上使用望远镜的结果是在天文学界导致了一场公开的争吵.海维留斯在争吵中拒绝做任何妥协。但是到他去世的时候.他几乎成了惟一一个不承认望远镜价值的人。



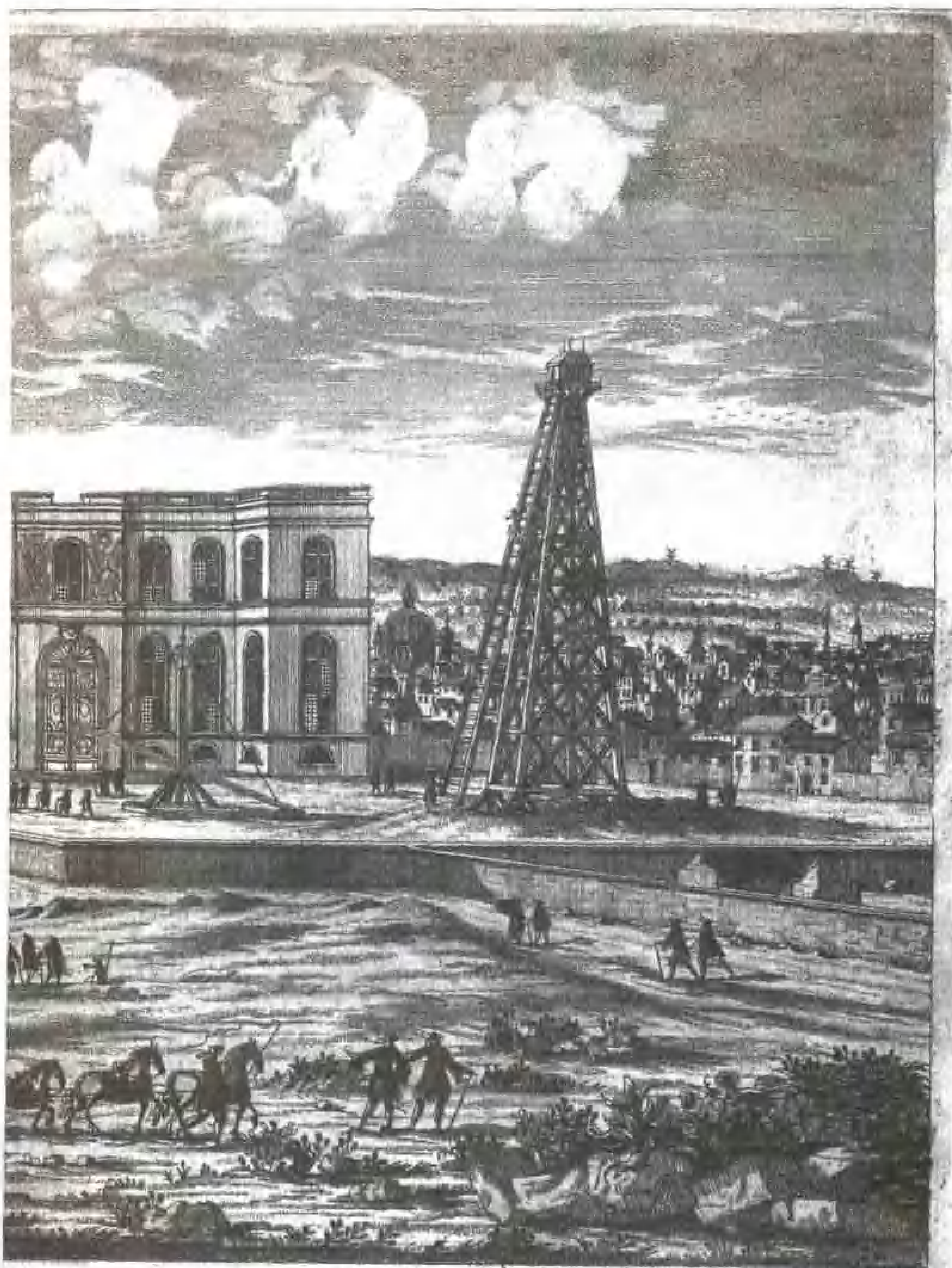
海维留斯使用他的方位象限仪进行测量。他称这种象限仪为exquisitissimus，说它“最灵敏”。他转动象限仪，把它调整到所需要的方向，然后用准尺瞄准要测量的星，用右手借助于平衡块来定位，接着读出刻度上的角度。左边的青铜小人对仪器起平衡作用。

随着路易十四的财务大臣J. B. 科尔伯(Jean Baptiste Colbert)于1666年建立了巴黎科学院，天文台这样的科学机构终于出现了。一个直接的结果是巴

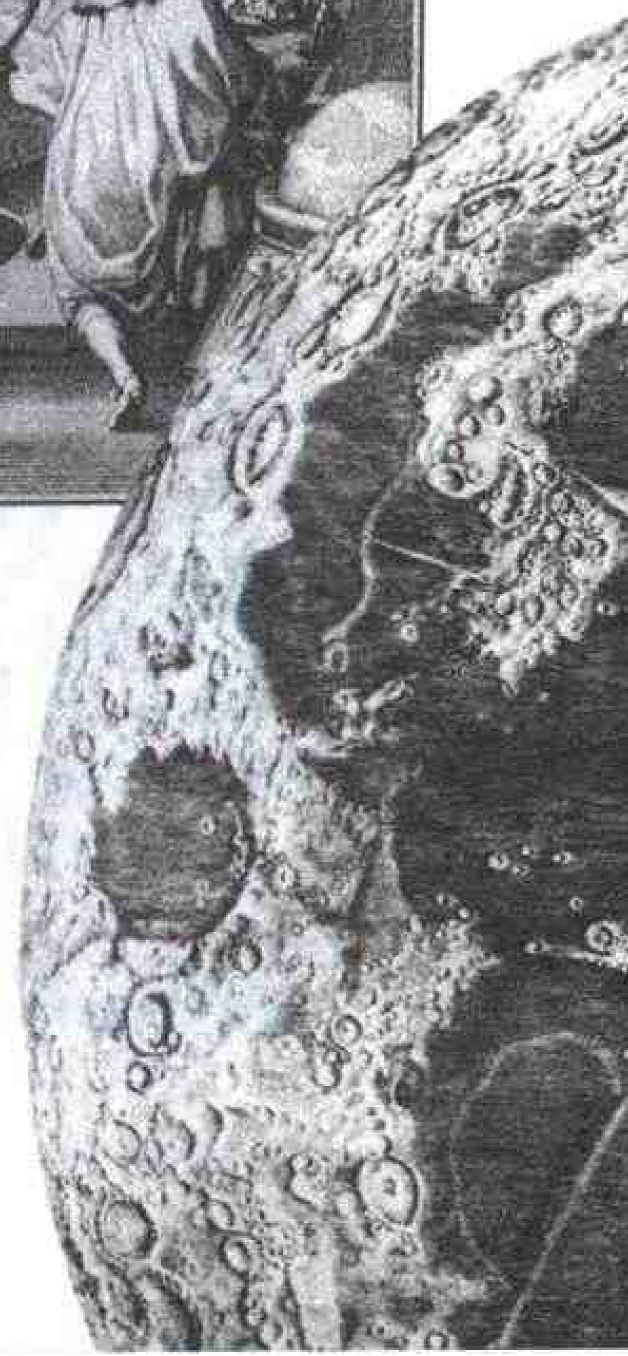


巴黎天文台的南侧。1667年始建，尽管1672年已经完成了全部建筑，但其内部设施的安装直到1683年才告结束。地上有一架望远镜，用吊索悬吊在一根杆子上。其右侧是一个高约130英尺的木塔。这里最初是凡尔赛附近马累的一座水塔，后来改建为巴黎天文台，并于1685年重新建造，以便为G. D. 卡西尼(Cassini)和他的同事所喜欢的那种无管超长型望远镜（见本书第133页）的物镜提供一个稳定的平台来放置它。在放置物镜时要使用一个梯子和一个附加的阳台以确保助手的安全。

黎天文台的建立，并从欧洲各地招募来了天文学家，由意大利人大卡西尼（1625-1712年，"天文学王朝"的创立者，因此被称作卡西尼一世）担任领导。



路易十四参观巴黎天文台。1665年，法国一位科学家提议建立具有广泛基础的科学院，巴黎天文台是该提议的结果之一。最初的打算是建成的天文台要为科学院提供会议室和图书馆，以供院士们使用。然而，天文台坐落于远离巴黎市中心之处，往来不便，因此，即使从其开张之日起，在天文台举行的也只有纯天文活动。在国王1682年5月1日的这次参观中，我们可以通过墙四周的遗迹看到天文台所具有的更广泛的功能。



月图。G. D. 卡西尼1679年绘于巴黎，直径22英寸。在准备阶段，卡西尼和他的助手们绘制了约60幅整体或部分的月面图。

科学院最有成就的招募活动是从荷兰引进了克里斯蒂安·惠更斯。当然这一引进代价不菲。科学院中另一位引人注目的人物是法国人埃德林·奥宙特（1622－1691年），他在发展线测微计方面发挥了核心作用。线测微计的发明使得天文学家可以测量微小的角度，方法是调整视场里的两根发丝或丝线，使它们与待测角度恰好相符（见第154页）。奥

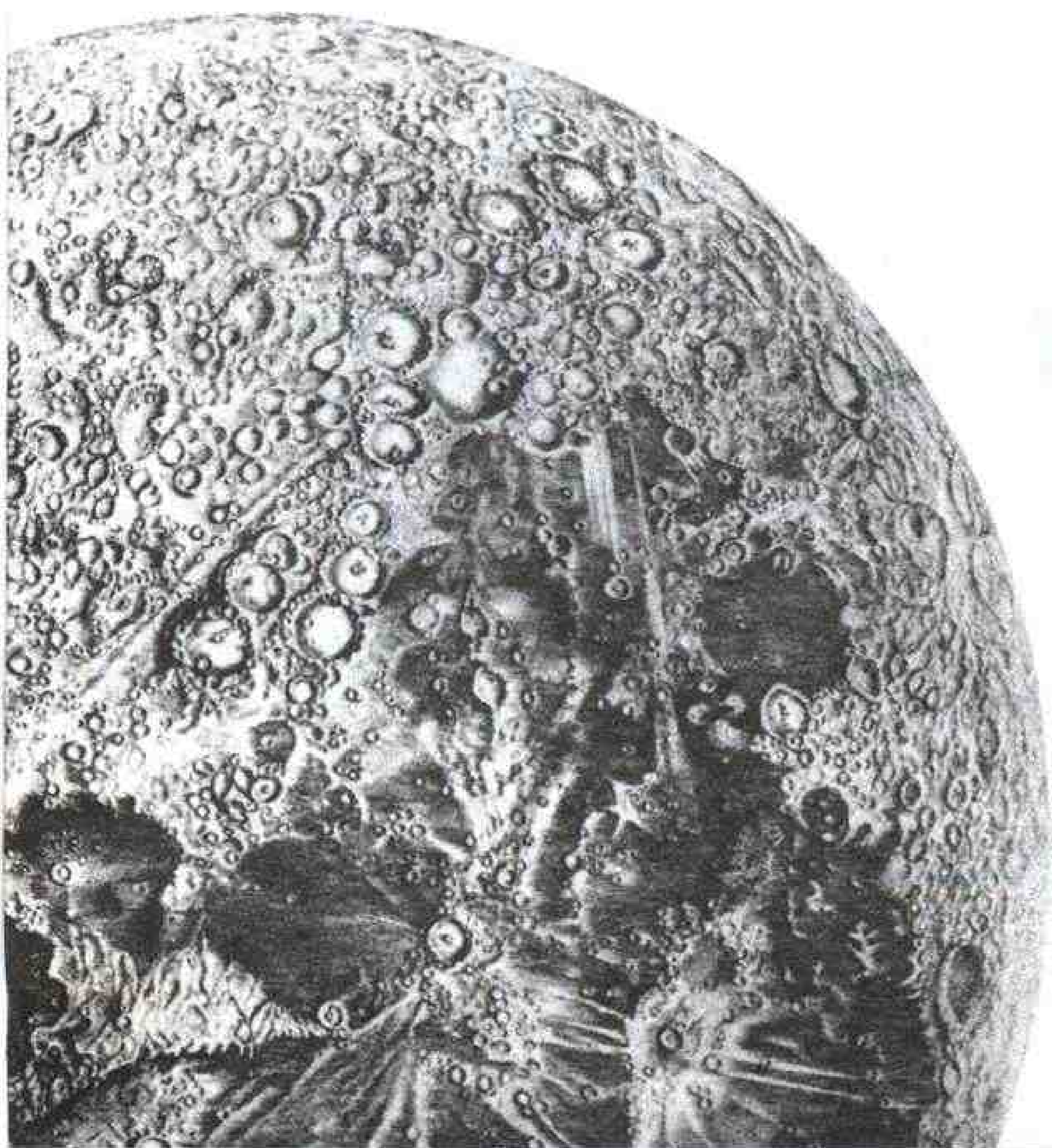
宙特还提议引进了J. 皮卡德（1620 – 1682年），他为解决地球大小问题带来了具有献身精神的观测者的全部技艺。

惠更斯曾经假定给定摆长的钟摆周期在世界各地是一样的，在这种情况下，就可以把每秒钟摆动一次的摆的长度作为一种自然单位。正因为如此，1661年，惠更斯向皇家学会提议以这一长度作为长度的通用标准。可是，不同的考察者用这一方法得到的却是不同的长度。1671年，科学院派J. 里歇（Jean Richer）到南美大西洋海岸的卡延（cayenne）岛进行天文观测，特别是来年火星接近地球时对火星进行观测。他的南美之行使这些麻烦发展到了顶峰：他随身带了一个秒摆，更准确地说，带了一个在巴黎时摆动一次为1秒的摆钟，但在卡延岛，里歇发现，他只有把摆长缩短十分之一，钟摆才能1秒摆动一次。

牛顿在其《原理》中对此提供了一个解释：地球在其赤道部分向外凸出。惠更斯遵循的是笛卡儿传统，他也得出了类似的结论，但凸起量到底有多大，他和牛顿的认识不同。

究竟谁是正确的？一段长时间的争论随之而起。最后法国科学院决定动用其财政力量解决该问题：为赴拉普兰、秘鲁这两个截然不同的地区测量纬度长度的考察活动提供了经费支持。考察活动的结论是地球在其赤道部分确实是凸起的，但是精确的凸起量究竟是多大，则没有得到解决。人们还进行了别的一些测量，但仍然没有给出确定的答案。

要在牛顿和笛卡儿之间做出选择的这种尝试最终在混乱中收场。但该问题却



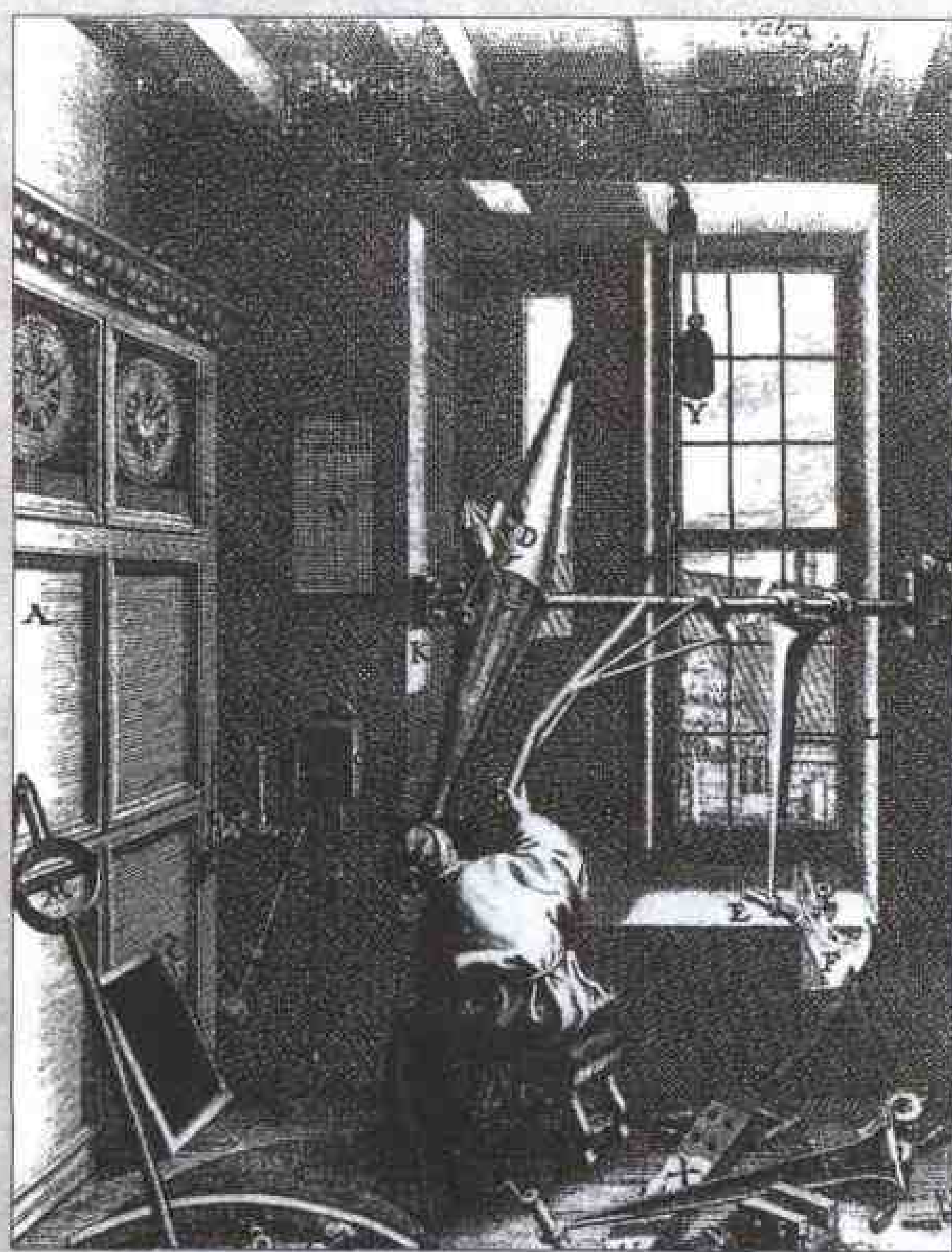


P. L. M. 德·莫佩屠斯（Maupertuis，1698—1759年）领导了法国科学院对拉普兰的考察，考察目的是要测定纬度一度的长度。他1737年出发，第二年返回，这次考察的成果令人满意，它证实了地球的两极是扁平的。在下面这幅雕刻中，他身着袍服，手按压着地球。正下方是拉着雪橇的小鹿，雪橇的上方是一首颂扬他的成就的诗。

天文学的基础

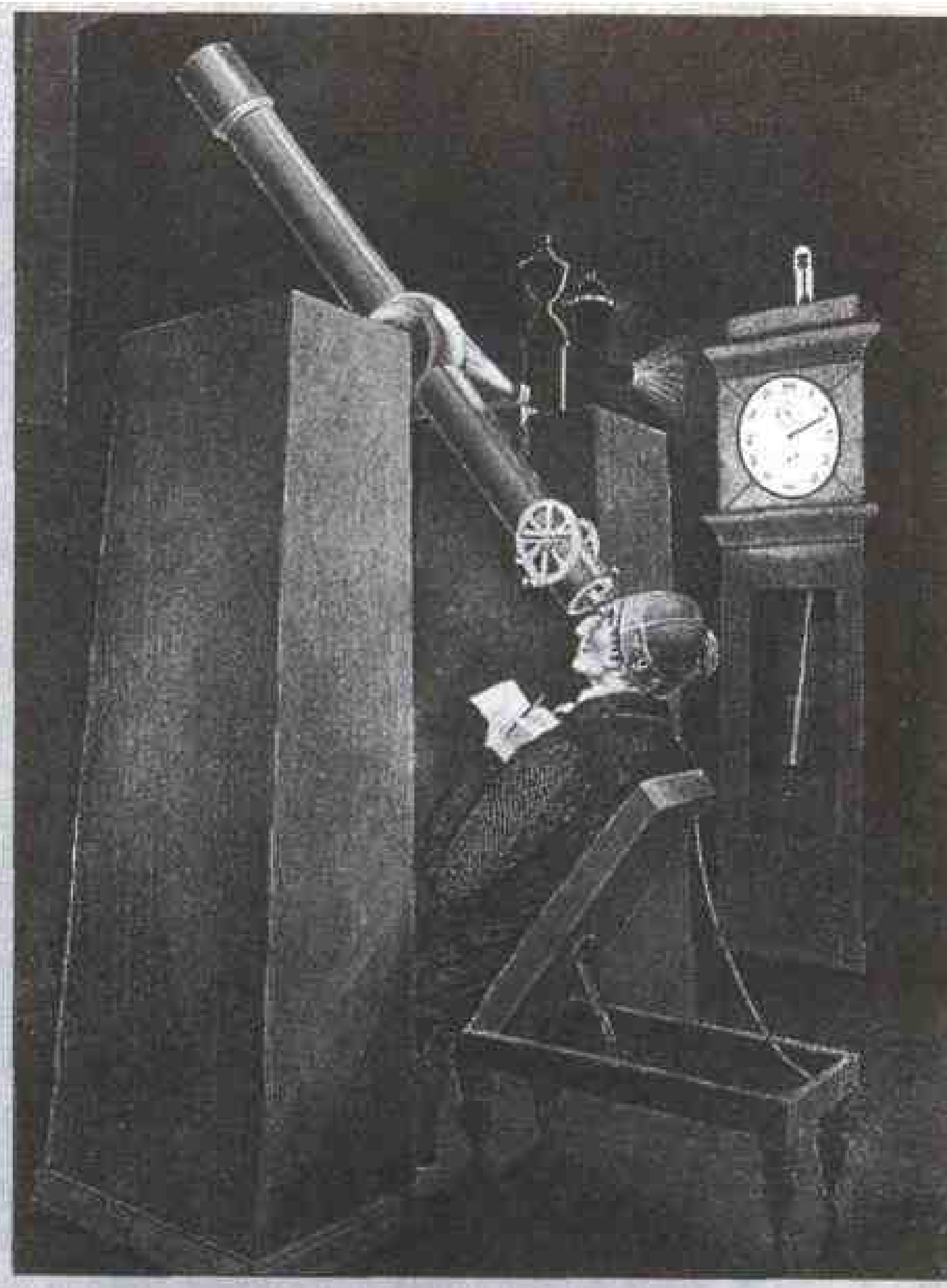
18和19世纪的天文台把不断提高对恒星和别的天体所做记录的精度和完整度视为自己的职责。相当于地球经度的天文量被称为赤经(RA),赤经的测量是从天赤道上的春分点开始的。由于地球每天自转一周,因此RA可以用度数或者时间(一小时等于15°)来表示,其基本的测量是测定天体经过当地天文台子午线(中天)的时刻。最早用来测定中天的安装有精密测量装置的仪器是由O·罗默建造的。1681年,罗默从巴黎返回,到丹麦领导哥本哈根天文台的工作,在那里他建造了那架仪器。天文台的中天仪的位置后来被表示为该天文台所在地的经度,从1884年开始,格林威治天文台中天仪所在的位置就被定义为世界的0经度线,该传统一直被延续至今。

为了测定天体经过中天时的高度,并由此得到其倾



O. 罗默(Ole Romer)于1684年在哥本哈根用他的中天仪进行测量。望远镜被精确地安装在子午线方位。为了测量恒星的赤经位置,罗默记录了被测星经过当地子午线的精确时刻。

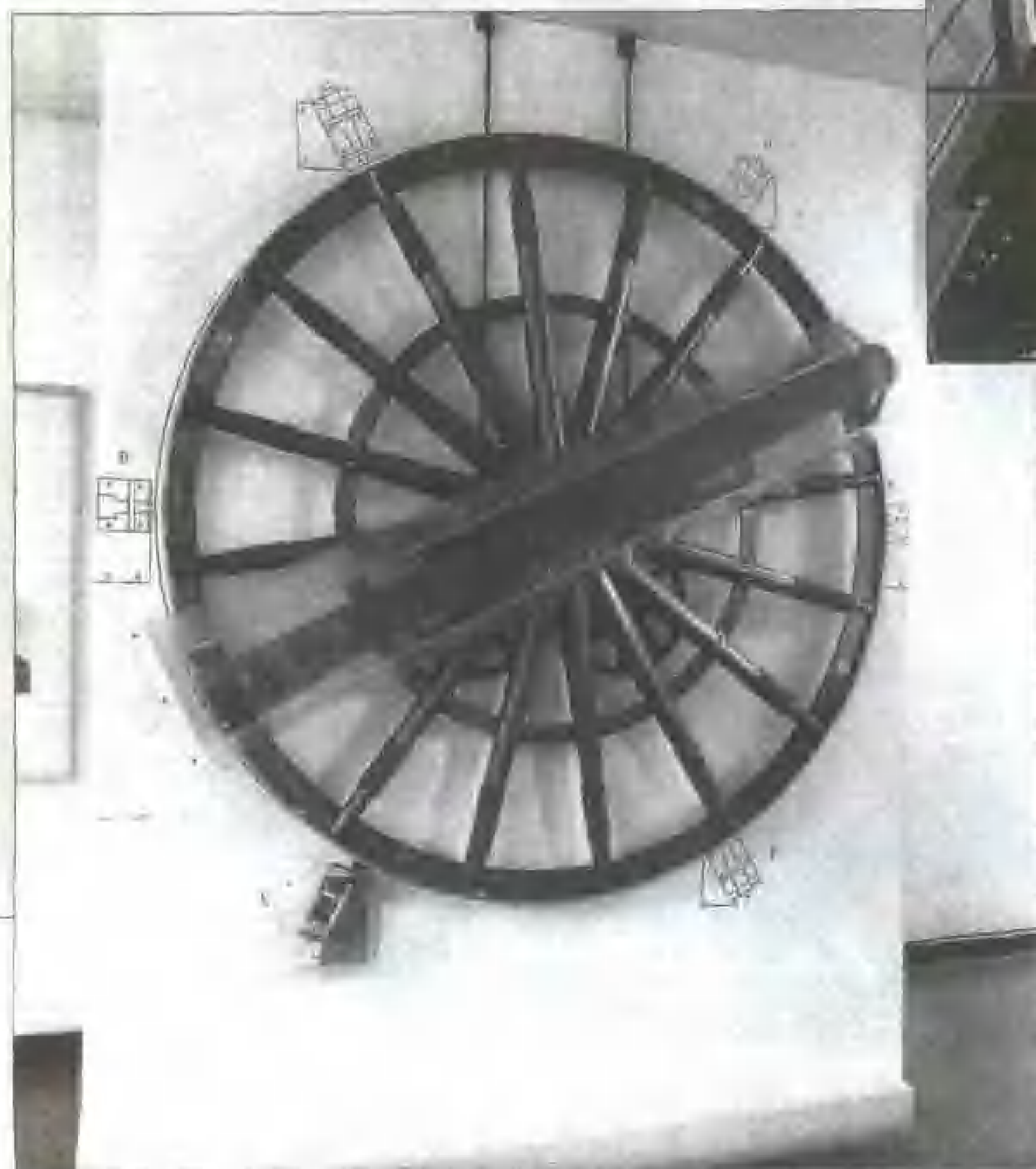
一个半世纪之后的同类仪器,用于同样的测量目的。英国业余天文爱好者威廉·亨利·斯迈斯(William Henry Smyth)在天文台的中天观测室里。



由于1759年一颗彗星的出现而很快在天文学家和公众间得到了解决。因为那颗彗星是由爱德蒙多·哈雷在六十多年前预报出来的,这使牛顿得到了神化——是一位牛顿主义者预见了不可预见的事情。

角（等价于天体的纬度）。天文台步第谷·布拉赫的后尘，使用象限仪或别的安装在墙上精确地沿南北方位放置的圆环上的某一部分进行测量。这些仪器上面当然都装上了望远镜。在19世纪，爱德华·特劳顿（Edward Troughton）领导英国制造业研制了一种墙象限仪，准备将它与中天仪组合应用（如同在它之后研制出来的仪器一样）。

然而，这架仪器至少在人力配备上显得代价高昂——测量时需要有两位观察者通力协作。欧洲大陆的仪器制造者们满足了精简人力这一需求，制造了一体化的精度足够高的中天仪。在这种中天仪上，过去的那种墙式环圈成为多余。很快，英国的仪器制造者们也不得不接受了这种新的设计。



爱德华·特劳顿1812年在格林威治天文台安装的墙象限仪。它可以测量星星经过子午线时的高度，这弥补了中天仪的不足。



1850年格林威治天文台安装的中天仪。它是由一个测量赤经的仪器和一个墙象限仪组合而成的。所需人员也很精简。到了1880年，由这台仪器测量的星上中天所确定的格林威治平均时成了大不列颠的法定时间。到了1884年，在华盛顿召开的一次会议决定采用过该天文台的子午线为世界原初子午线。

哈雷彗星的回归

牛顿在其《原理》中曾经表明，彗星的轨道虽然远远不同于行星近似于圆形的椭圆轨道，但它仍然像法定的一样在太阳系里沿圆锥曲线的一部分运行。彗星的轨道伸得很长，在太阳附近，其轨道近似于抛物线。

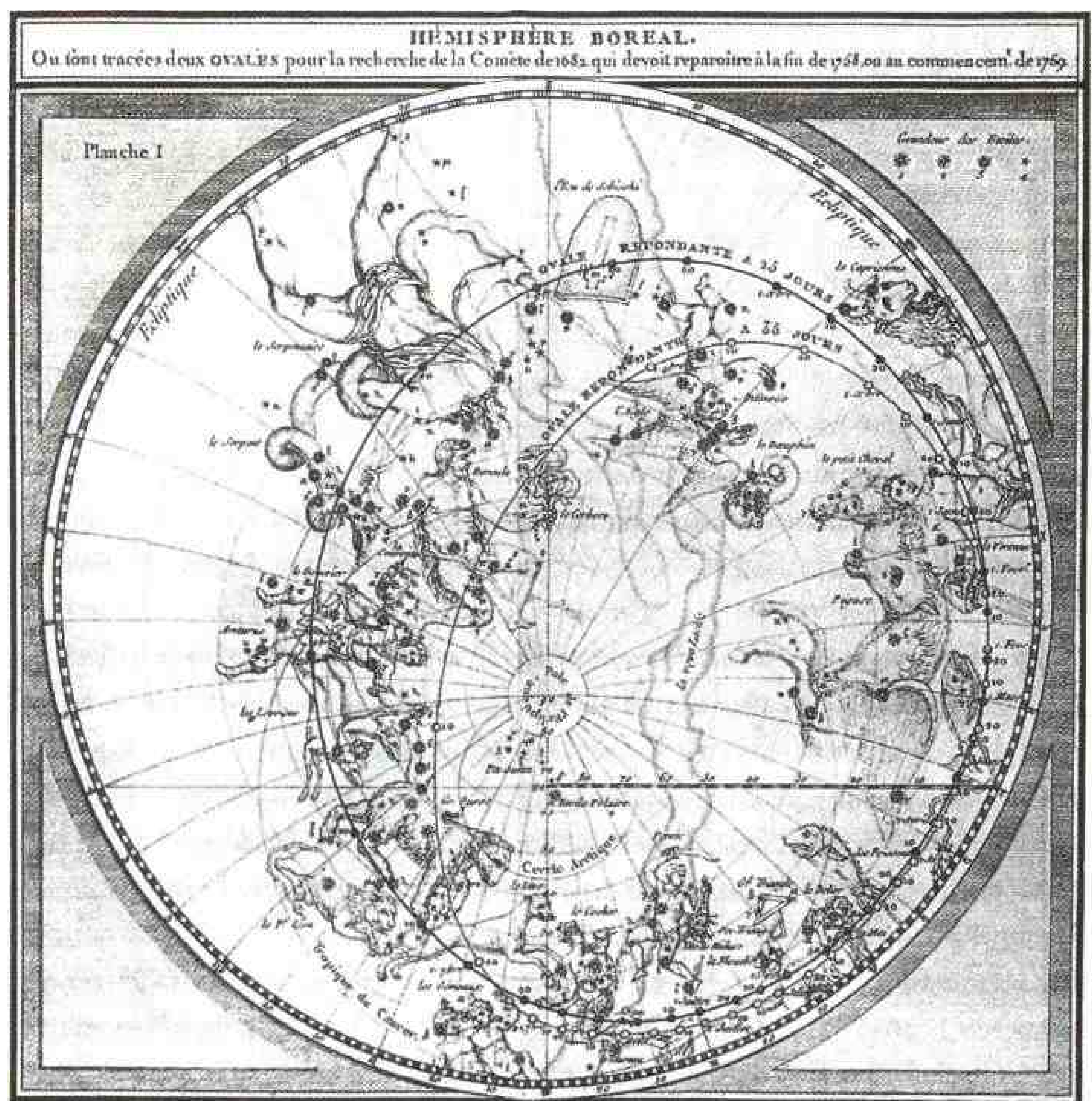
然而，除非其速度足够大，否则彗星在背向太阳运动时，将很难越出太阳的作用范围。与彗星会逃离太阳系的猜测相反，彗星是沿椭圆轨道离开太阳的，并且注定有一天会被再次拉回到太阳系里——当然，如果它曾从一颗大行星附近经过，它回归的路径与其先前对太阳系的拜访相比，会有所修正。但是即使有过这样的修正，同一颗彗星的每一次出现，其轨道也总会有某些类似的特征，而且每次出现的时间间隔也应该是类似的。这样的例子能否在历史记录中找到呢？

哈雷对此做了必要的调查，并且很快发现1682年的那颗彗星是最佳候选：它的轨道是倒退的（即是说，感觉上与行星轨道方向相反），而1531年和1607年的那两颗彗星也同样如此。进一步的研究表明，这些彗星的轨道在别的方面也有很多相同之处。1695年，哈雷告诉牛顿说，他觉得它们一定是出现于不同时期的同一颗彗星。

问题在于，这颗彗星每次出现的时间间隔虽然相近，但并不完全相同。哈雷意识到这是由于它在运行中，受到了一颗或多颗行星的引力作用，因而轨道产生了变形，他预测这颗彗星将于“1758年年底或来年年初”回归。

哈雷1705年制作的24颗彗星轨道数据表。如果牛顿是对的，彗星受到的是遵循平方反比规律的引力的作用，那么环绕太阳运行的彗星轨道将会是椭圆、抛物线、或双曲线。如果是椭圆的话，彗星一定会回归。1695年，哈雷注意到1531、1607和1682年的三颗彗星在轨道上是相似的。在对它们做了进一步的研究之后，哈雷得出结论说，它们是同一颗彗星（哈雷彗星）在不同时期的再现。

Cometæ Anni.	Nodus Ascend.	Inclin. Orbitæ.	Perihelion in Orbe.	Perihelion in Ecliptica	Latitudo Perihelii	Distantia Perihelia à Sole.	Log. dist. Periheliæ à Sole.	Temp. æquat. Perihelii Londini.
	gr. ′ ″	gr. ′ ″	gr. ′ ″	gr. ′ ″	gr. ′ ″			die. h. ′
1337	♊ 24. 21. 0	32. 11. 0	♉ 7. 59. 0	♉ 12. 45. 15	22. 40. 30 B	40666	9.609236	Junii 2. 6. 25
1472	♑ 11. 46. 20	5. 20. 0	♉ 15. 33. 30	♉ 15. 40. 20	4. 25. 50 A	54273	9.734584	Feb. 28. 22. 23
1531	♉ 19. 25. 0	17. 56. 0	♒ 1. 39. 0	♒ 0. 48. 15	17. 3. 05 B	56700	9.753583	Aug. 24. 21. 18½
1532	♊ 20. 27. 0	32. 36. 0	♋ 21. 7. 0	♋ 16. 59. 40	15. 57. 00 B	50910	9.706803	Oct. 19. 22. 12
1556	♍ 25. 42. 0	32. 6. 30	♑ 8. 50. 0	♑ 11. 0. 00	31. 10. 20 B	46390	9.666424	Apr. 21. 20. 3
1577	♈ 25. 52. 0	74. 32. 45	♌ 9. 22. 0	♍ 7. 53. 00	09. 35. 20 A	18342	9.263447	Octo. 26. 18. 45
1580	♈ 18. 57. 20	64. 40. 0	♋ 19. 5. 50	♋ 19. 17. 10	64. 40. 0 B	59628	9.775450	Nov. 28. 15. 00
1585	♉ 7. 42. 30	6. 4. 0	♈ 8. 51. 0	♈ 8. 59. 10	2. 55. 25 A	109358	0.038850	Sept 27. 19. 20
1590	♍ 15. 30. 40	29. 40. 40	♏ 6. 54. 30	♏ 2. 55. 50	22. 45. 50 A	57661	9.760882	Jan. 29. 3. 45
1596	♒ 12. 12. 30	55. 12. 0	♏ 18. 16. 0	♏ 22. 44. 35	54. 44. 30 B	51293	9.710058	Julii 31. 19. 55
1607	♉ 20. 21. 0	17. 2. 0	♒ 2. 16. 0	♒ 1. 29. 40	16. 10. 5 B	58680	9.768490	Oct. 16. 3. 50
1618	♊ 16. 1. 0	37. 34. 0	♈ 2. 14. 0	♈ 6. 10. 00	35. 50. 0 A	37975	9.579498	Oct. 29. 12. 23
1652	♊ 28. 10. 0	79. 28. 0	♈ 28. 18. 40	♊ 10. 41. 35	58. 14. 0 A	84750	9.928140	Nov. 2. 15. 40
1661	♊ 22. 30. 30	32. 35. 50	♋ 25. 58. 40	♋ 21. 37. 30	17. 17. 0 B	44851	9.651772	Jan. 16. 23. 41
1664	♊ 21. 14. 0	21. 18. 30	♌ 10. 41. 25	♌ 8. 40. 35	16. 1. 50 A	102575½	0.011044	Nov. 24. 11. 52
1665	♏ 18. 02. 0	76. 05. 0	♊ 11. 54. 30	♉ 24. 6. 35	23. 8. 0 B	10649	9.027309	Apr. 14. 5. 15½
1672	♑ 27. 30. 30	83. 22. 10	♉ 16. 59. 30	♋ 9. 26. 00	69. 27. 40 B	69739	9.843476	Feb. 20. 8. 37
1677	♏ 26. 49. 10	79. 03. 15	♌ 17. 37. 5	♋ 16. 21. 05	75. 44. 10 B	28059	9.448072	Apr. 26. 00. 37½
1680	♑ 2. 2. 0	60. 56. 0	♐ 22. 39. 30	♐ 27. 26. 50	8. 11. 10 A	00612½	7.787106	Dec. 8. 00. 6
1682	♉ 21. 16. 30	17. 56. 0	♒ 2. 52. 45	♒ 2. 0. 30	16. 59. 20 B	58328	9.765877	Sept. 4. 07. 39
1683	♍ 23. 23. 0	83. 11. 0	♊ 25. 29. 30	♋ 10. 36. 55	82. 52. 00 B	56020	9.748343	Julii 3. 2. 50
1684	♐ 28. 15. 0	65. 48. 40	♏ 28. 52. 0	♐ 15. 15. 25	26. 35. 20 A	96015	9.982339	Maii 29. 10. 16
1686	♓ 20. 34. 40	31. 21. 40	♊ 17. 00. 30	♊ 16. 24. 00	31. 17. 35 B	32500	9.511883	Sept. 6. 14. 33
1698	♐ 27. 44. 15	11. 46. 0	♑ 02. 51. 15	♑ 0. 47. 20	0. 38. 10 A	69129	9.839660	Oct. 8. 16. 57



用来探测哈雷彗星回归的地图。哈雷曾推测这颗彗星将于1757/1758年之间的那个冬天回归，在探测它的竞赛中，J.尼古拉斯·德利尔（Joseph Nicolas Delisle）从过去的记录中判断，有可能在它绕太阳转向（在“近日点”处）之前一个月用望远镜观测到它。他以10天为间隔，计算了它的位置，在推测它将于抵达近日点前35天或25天被观测到的基础上，在地图上标出了其相应位置。然后他让查里斯·梅西叶（Charles Messier）沿着连接这些日期的相应弧段进行观察。1759年1月21日，梅西叶观测到了回归中的这颗彗星。

在一般公众的意识里，彗星是灾难的前兆，而即使是天文学家，他们对彗星的本质以及彗星在宇宙秩序里的作用也不甚了了。因此，随着1758年的到来，人们对这颗彗星的兴趣也随之高涨起来。一些人担心它会撞向地球，使人类走上末日。

哈雷在其预测中，考虑到了这颗彗星在接近其1682年绕太阳运行的路段时所受到的木星的引力，但是他没有把彗星离开太阳系时木星的引力所起的相反作用计算在内。要对此做出修正，需要进行细致而又艰苦的计算，1757年6月，A-C·克雷洛在两个助手的帮助之下在巴黎开始了此项工作。他们先分析了该彗星1531年出现时离太阳系而去的轨道，在此基础上“推算”了它1607年的回归轨道，并将“推算”结果与实际情况加以比较。然后他们又分析了该彗星1607年的离去轨道，再用类似的方法“推算”了其1682年的回归情况。通过这样的“准实验”，他们用同样的方法推算出了该彗星未来的回归情形：它将于1759年4月中旬在太阳附近绕行，历时一个月。

他们的预言相当准确。这颗回归的彗星于1758年的圣诞节首先被居住在德勒斯登附近的一位农民看到，而第一位看到它的专业人员则是巴黎的彗星猎手——

查里斯·梅西叶（1730－1817年），不过他已经比那位农民晚了4个星期。3月13日，彗星进入对太阳绕行的轨道。

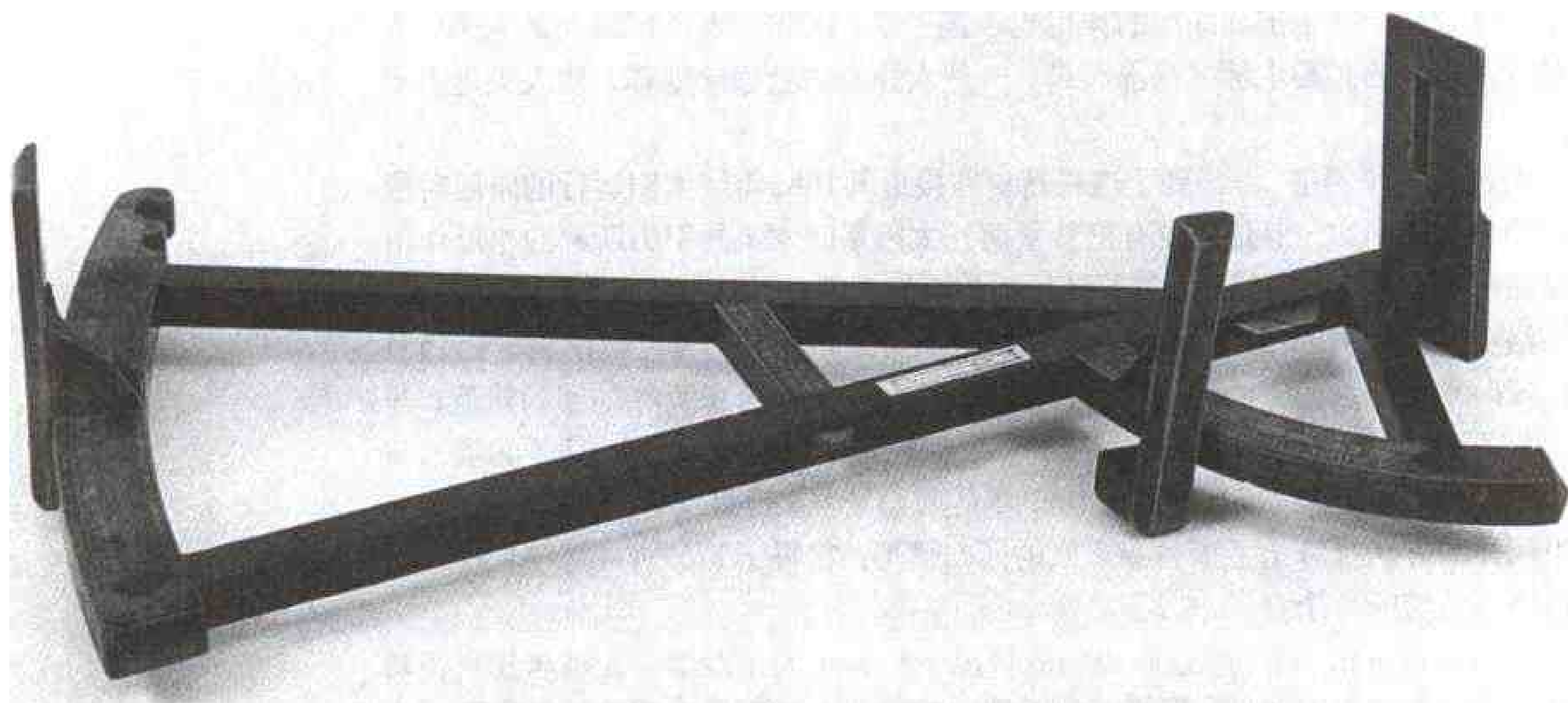
这颗彗星的轨道特征与1531年、1607年和1682年的彗星十分相似，它们是同一颗彗星：哈雷被证明是正确的，牛顿主义在公众中赢得了最广泛的胜利。

牛顿主义者的计划

在人们热衷于对牛顿的引力进行这些公开检验的同时，少数几个数学精英却在默默地伏案工作，探究在太阳、行星及其卫星之间引力的作用效果。为了实现这一牛顿主义者的计划，上帝为他们准备了一群18世纪中叶杰出的数学家：达朗贝尔（Jean le Rond d'Alembert，1717–1783年），他的名字得自于巴黎的一座教堂，他是一个弃儿，人们就是在那座教堂里发现他的，他居住在巴黎，靠从其生父那里领取的年金生活，后来他把自己的生命献给了数学；S. L. 欧拉（Swiaa Leonhard Euler，1707–1783年），他先是受雇于圣彼得堡的叶卡捷琳娜大帝（Catherine the Great），后来又为柏林的弗里德里希大帝（Frederick the Great）服务，最后他又回到圣彼得堡，并在那里去世；早熟的克雷洛（Alexis–Claude Clairaut，1736－1813年），他才12岁就开始了与巴黎科学院联系在一起的生涯；杜林（意大利城市）的J. L. 拉格朗日（Joseph Louis Lagrange，1713–1765年），他先是被说服前往柏林，后来又到了巴黎。在18世纪的最后十年和19世纪的头十年里，拉普拉斯（Pierre Simon de Laplace，1749–1827年）独领风骚，他在法国大革命中得以存活，最终以侯爵身份去世。

这些数学家们常常暗自竞赛，他们处理完了一个"天文物理"问题接着就处理另一个。在这一过程中他们创造出了必要的数学工具，例如牛顿那种烦琐的近似三角学的几何方法就被与无穷级数有关的技艺替代了，这种级数能够以抽象方

1736年在伦敦制造的一架"背杆仪"。航海家们在航海中希望能判定他们所在的纬度，为此他们常用那种"十字仪"（见本书第75页）测定太阳的地平高度，这需要直视太阳，并且须在航船运行中使十字杆的一端与地平线保持一致。背杆仪的出现改善了这种局面。航海者背对太阳而立，手持背杆仪，使其保持铅直状态，让影标（右侧的弧段）的影子落在水平标的缝口（右远方）。与此同时，他通过视标（左边）上的针孔和水平标观看地平线。在太阳经过当地的子午线上空时进行这种测量。在该仪器的两弧段上安装上指示角度的部件，还可以测量太阳上中天时的高度。



式加以处理。即使如此，研究者们也不得不对其结果取某种近似，他们在处理无穷级数时，常常需要做出判断，认定级数的哪些项具有重要意义，哪些项是可以忽略不计的。

这些困难是不可避免的，克雷洛对月亮在其轨道远地点处的运动的研究就给我们提供了一个这样的例证。1747年，他宣布说在所观察到的运动现象中，引力只对其中的一半起作用（欧拉和达朗贝尔也独立地得出了这一结论），因此他建议在平方反比定律上加上一个第四力项。但是一年后，在对近似项做了进一步的研究之后，他发现牛顿表述的该定律事实上对所有观察到的运动都适用。

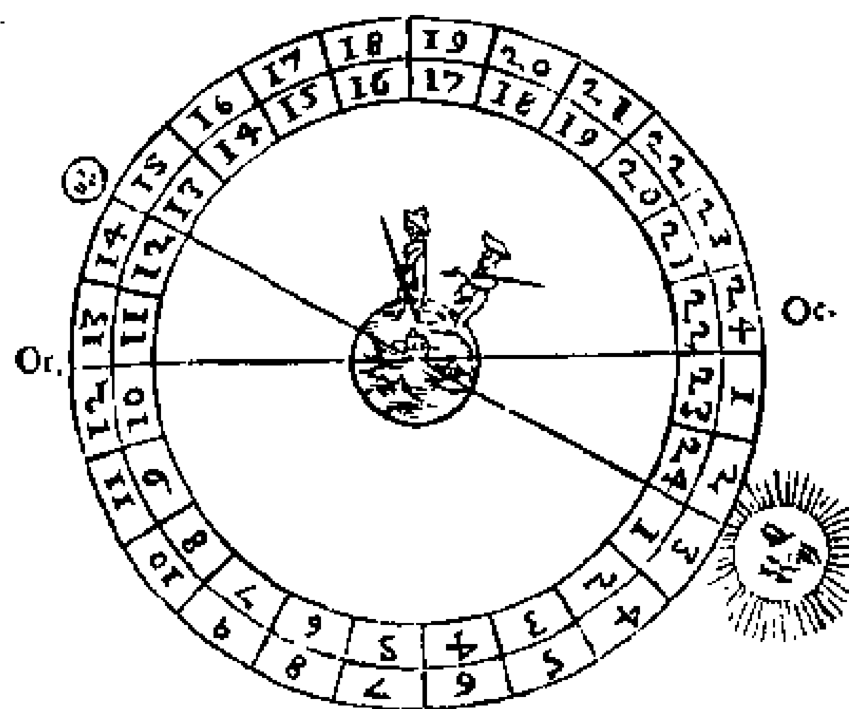
人们对月亮有特殊的兴趣，这不仅是因为有关其运动不规则性的观测数据异常完整，而且也因为它预示着一种希望：对这些不规则性的征服将会使数学家们能够解决每一个远离陆地的海员所面对的一个迫切问题——如何确定他所在位置的经度。"建立"经度对于地理学家和天文学家也同样具有极大的重要性：地理学家需要用它来制作精确的地图，而天文学家则需要用它来为在不同的天文台所做的观测数据之间建立联系。

经度的确定

从定义上来说，地球北半球某处的纬度等于当地天北极（天空中恒星所围绕着旋转的那个点）的高度，因此，在陆地，纬度的确定被认为是毫无问题的。即使在海上，文艺复兴时期的海员们也能够通过测量极星的高度或者太阳上中天时的高度（见78—79页）来确定他们所在的纬度。

经度表示的是一个城市、或一条船在像格林威治那样的标准位置之东或之西的角度的大小。经度的确定是一件很困难的事情。不同的地方时相应于不同的经度，一小时对应于圆周的1/24，即15°。用太阳或星星确定某一给定地点的地方时是直截了当的，例如，当太阳正向着正南方时，就是中午。但是要确定两个地点之间的时差，就必须同时测定它们各自的地方时，可怎样才能做到这一点呢？

在古代，希帕恰斯曾经指出，月食是一种有效的时间信号，发生月食时，地球上任何能看到月亮的地方都会同时看到它。在其后的年代里，如果在地球陆地的两个地方观察到了同一次月食，并且把发生月食时当地的地方时也记录了下来，那么就可以通过时差计算出这两个地方的经度差来。例如，人们曾预计1631年要发生一次月食，当时伦敦格雷汉姆学院的天文学教授亨利·盖里布兰德（Henry Gellibrand，1597—1636年）和去寻找西北航路的那个船长约定，两人都观测该次月食，并记录下发生月食的时间。在1663年出版的《托马斯·詹姆斯船长奇特而又危险的航行》（The Strange



利用月食测定经度差。观察者在不同的经度观测月食，他们是同时看到月食的，但其所处经度的地方时却不同。地方时每差1小时，相应的经度差15°。在这幅585年的图表中，太阳在右下方，月亮在左上方，地球在圆心，月亮位于地球的影子中。图中竖直站立的观察者观测到月食的时间标在外层，而另一位观察者观测到月食的时间则标在内层，内层比外层晚了两个小时。因此，它们相应的经度差是30°。

and Dangerous Voyage of Captaine Thomas James）一书的附录中，盖里布兰德得出结论说，在伦敦和加拿大詹姆斯湾的查尔顿岛之间的经度差是79°30′（误差约15′）。但是对于远海航行的船员来说，月食太罕见了，难以利用。即使陆地上的观察者也会发现，月食发生的时刻是很难定义的。

在16和17世纪的一段时间里，事情似乎有望解决：海员们配备了合适的图表，他们也许会利用磁北极和真正地理北极的差别或者磁倾角和水平线间的夹角等因素为建立经度问题做出贡献，因为这些因素是与经度结合在一起的（见第135页）。但这些希望最终全部落空，船员们继续依靠"过去的估计"，换句话说，依靠"猜测"来判定经度。

在一眼望不见陆地的远海中航行非常危险，这一观念就像军舰和商船上定时敲响的钟声一样，不断地在公众那里被提及。对不列颠来说，最糟糕的海难发生于1707年的9月，当时一支舰队由直布罗陀出发向东航行，舰队途中认为自己是航行在英吉利海峡，结果导致4艘战船在夕利群岛处失事，2000名战士命丧海底。

1713年，威廉·惠斯顿和一位叫做迪顿（Humphry Ditton）的教师宣称说他们找到了在海洋上建立经度的方法，如果给他们合适的奖励，他们愿意把该方法公之于世。他们的方法很奇特——需要在远洋里固定位置处停泊船只，这是不可能的。但他们的宣告却刺激英国议会建立了经度局，该局以权威方式发表公告，称愿意给能够提供在海洋上测定经度的实用方法的人士以重奖，确定经度1度的，给奖金1万英镑，如果测定的精度加倍，那么奖金也加倍。

当时有两种方法存在着激烈的争论。第一种是个技术问题：如何提高钟表的精度，使之能够经得起在海洋狂风吹击下船只的颠簸？如果这一问题得到了解决，那就会给海员提供一个标准时间，使他们能将其与地方时加以比较。克里斯蒂安·惠更斯设计了一种用摆驱动的钟，他希望即使在狂暴的海洋上，其钟摆也能保持有规律的摆动。1668－1670年间，人们在由法国到地中海的航船上对他的摆钟做了测试，后来又在远航到好望角的船只上做了进一步的测试，这些测试表明，该问题并未得到解决。

另一种方法得到了强烈支持，但那种方法从科学的角度来看相当复杂。它要求考虑月亮的位移。月亮在空中运行迅速，在恒星背景上每小时移动相当于其直径的距离。这就像一个使用方便的钟表的时针在表盘上的数字之间移动时会告诉人们时间一样，人们指望月亮在恒星背景上移动时也能被用来辨别时间。

为了能够读出月亮钟的时间，海员们需要3样东西：(1)一件有一定精度且使用方便的测角仪器，用它能够测出月亮现在的位置与一个合适的参考恒星之间的角度；(2)达到一定精度的恒星位置表；(3)达到一定精度的月离表。在17世纪末，这3样东西都不具备。也不存在适用的别的仪器：那些能够找到的像十字杆仪（见第81页）那样的仪器，要求使用者同时观看两个物体，而在海上要这样做的话，就不会有任何测量精度可言。就恒星位置来说，第谷·布拉赫包含777颗恒星的星表是在发明望远镜之前完成的，而约翰尼斯·海维留斯在编写他那超过1500颗恒星的星表时则拒绝使用望远镜，该星表在他去世后直到1690年才得以出版。而且，还缺乏可信的月离表，这是最大的问题。月亮运动表现得十分复杂，尽管牛顿已经揭示了隐藏在这种复杂运动背后的动力学，但他的1713年版的《原理》一

书中的月球理论所导致的误差仍然达到了好几个弧分，这一误差对判定海船位置所带来的不确定性很容易地就达到了100英里。

如果做个统计的话，在18世纪早期，有三分之二的问题已得到改进。1731年，双反射象限仪问世，用它在海上测量天体之间的角度既适用又能保证一定精度，这种仪器成为今天六分仪的前身。约翰·弗拉姆斯提德的"不列颠星表"也于1725年得以出版，该星表包含了3000个恒星的位置；该书出版时弗拉姆斯提德已不在人世，但早在半个世纪前，他已被英王查理二世任命为皇家天文学家，查理二世还为他建造了格林威治天文台，特别希望这个天文台能够满足航海的需要。

现在该是数学家们来关注月亮运动、计算月离表的时候了。大约在这个世纪

木星的卫星和经度

1610年，伽利略发现木星有4颗卫星，两年后，他观察到了其中的1颗被木星所食的现象。他意识到这种木食比月食要容易定义得多，而且也频繁得多，因此也许可以用来作为测量经度的时间信号。尽管人们公认木食的频繁程度还不足以满足海员们的要求，但是可以用一个制作好了的木星卫星动态数据表来代替，当然其精度要低得多。

1598年，西班牙国王鉴于其舰队在世界各大洋航行的现实，设立了高额奖金奖励能够"建立经度"的人。伽利略在利用其发现为自己谋取经济利益方面从不犹豫，这次他也很快就与西班牙政府开始了利用木食解决这一问题的谈判。但是在一个起伏不定的航船的甲板上用望远镜很难看到木星，更别说它的卫星了。尽管设法给船员装备了摇动平台，它可以减轻这种晃动，但实验的结果表明，这种方法面临的实际困难太大，不可能在航海中得到采用。

而在陆地上应用这种方法，精度高低则成了主要的取舍标准。为此，需要有一个可信的木星卫星交食表，但是直到1668年，经过卡西尼一世的工作，这样的星表才成为可能。这一新技术被法国天文学家很快加以利用了，例如，上一个世纪，第谷·布拉赫在汶岛的巴尔第克进行了大量观测，在将其观测数据与进展中的巴黎的天文观测建立起相互关联之前，人们不得不尽可能小心地求出这两地之间的经度差。1671年，让·皮卡德获得巴黎科学院的信任，与D. E. 巴特林（Danes Erasmus Bartholini）和O. 罗默（Ole Romer）一道领受了这项任务。他在汶岛花了8个月的时间，对木卫一的交食进行了系列观察，与此同时，卡西尼在巴黎做了同样的工作。皮卡德一回来，他们就将其数据做了比较，从而得出了所需要的两地之间的经度差。

卡西尼的天象表。图中表页所示系与木星的卫星有关的1668年1月的天象。上页：下午7时每天天象。右页：交食时间（用小时和分钟表示）等。



格林威治天文台

1673年，英王查理二世成立了一个委员会，用以考查持续不断的关于磁罗盘可以用来提供一套坐标，这套坐标可以代替经度的说法。当该委员会在研究这一问题时，一位前来宫廷拜访的法国人宣称，他已经找到了依据月亮运动建立经度的方法。使国王感到惊讶的是，即使这种方法在理论上可行，但其所需的具有必要精度的天文数据看来也还没有被收集起来。

弥补这一缺陷，有赖于国王的力量。1675年初，一份皇家委任状被签发了，委任状开篇伊始就说，"在这里，我们任命忠实的、受人爱戴的艺术大师约翰·弗拉姆斯提德为我们的天文观察员，并要求他立刻以最谨慎和最勤奋的态度全身心地投入订正天体运行表、恒星位置表等项工作之中，以找到人们渴望已久的对航海至关重要的那些地方的经度来。"

为了完成国王交给的任务，弗拉姆斯提德需要一个永久的天文台。在克里斯托弗·雷恩的建议之下，台址选在了格林威治的一个山坡的城堡上（见本书第168—169页跨页图）。建造工作当年就开始了。1676年7月10日，弗拉姆斯提德搬了进去，到了9月19日，他就正式开始观测了。

该天文台直到第二次世界大战末期仍存在于格林威治，其领导人是后续的皇家天文学家。第二次世界大战末期，战争的破坏、光线以及伦敦烟雾的干扰，使该机构经常处于瘫痪状态，大批研究人员这才被迫离去。

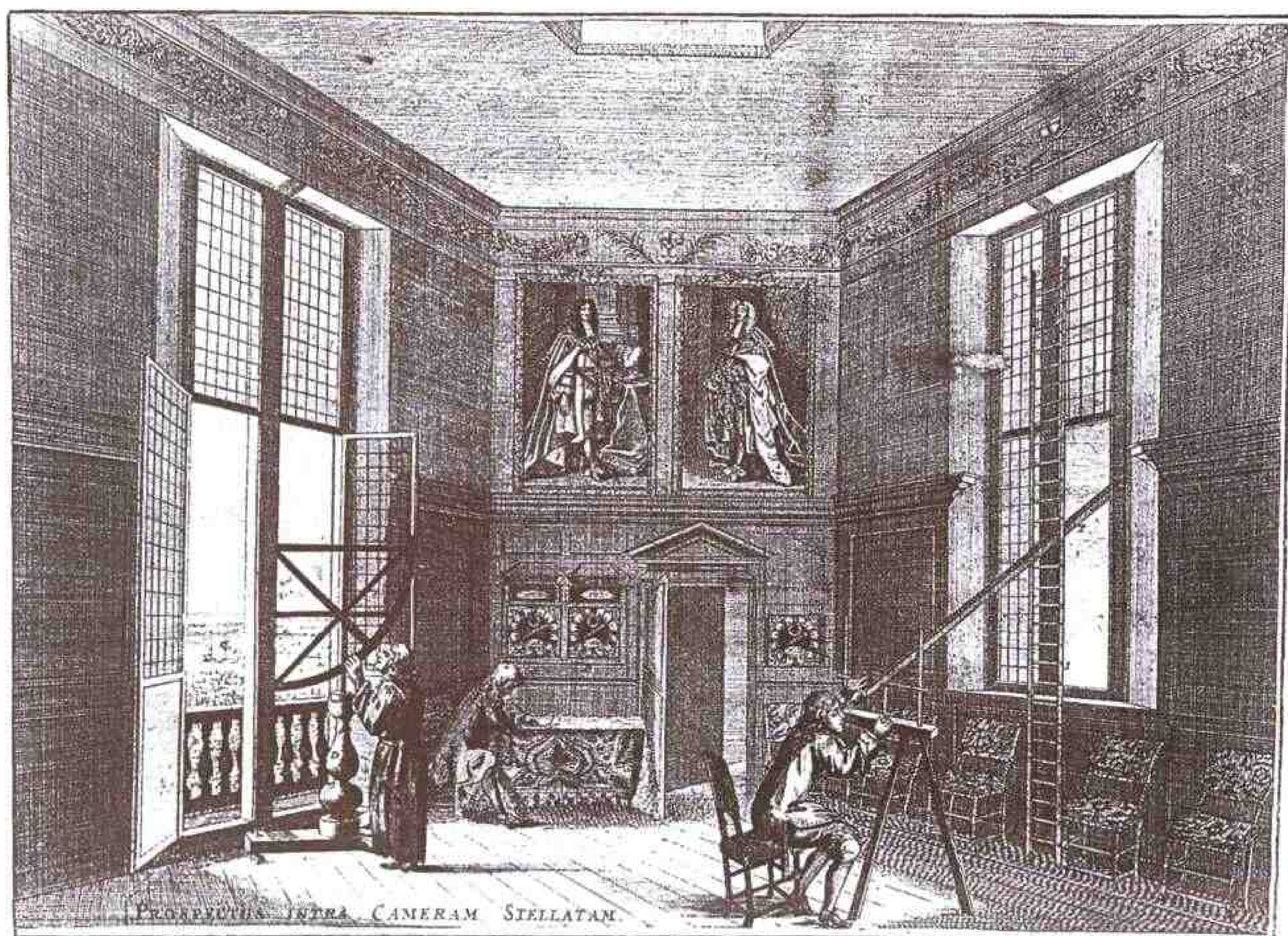


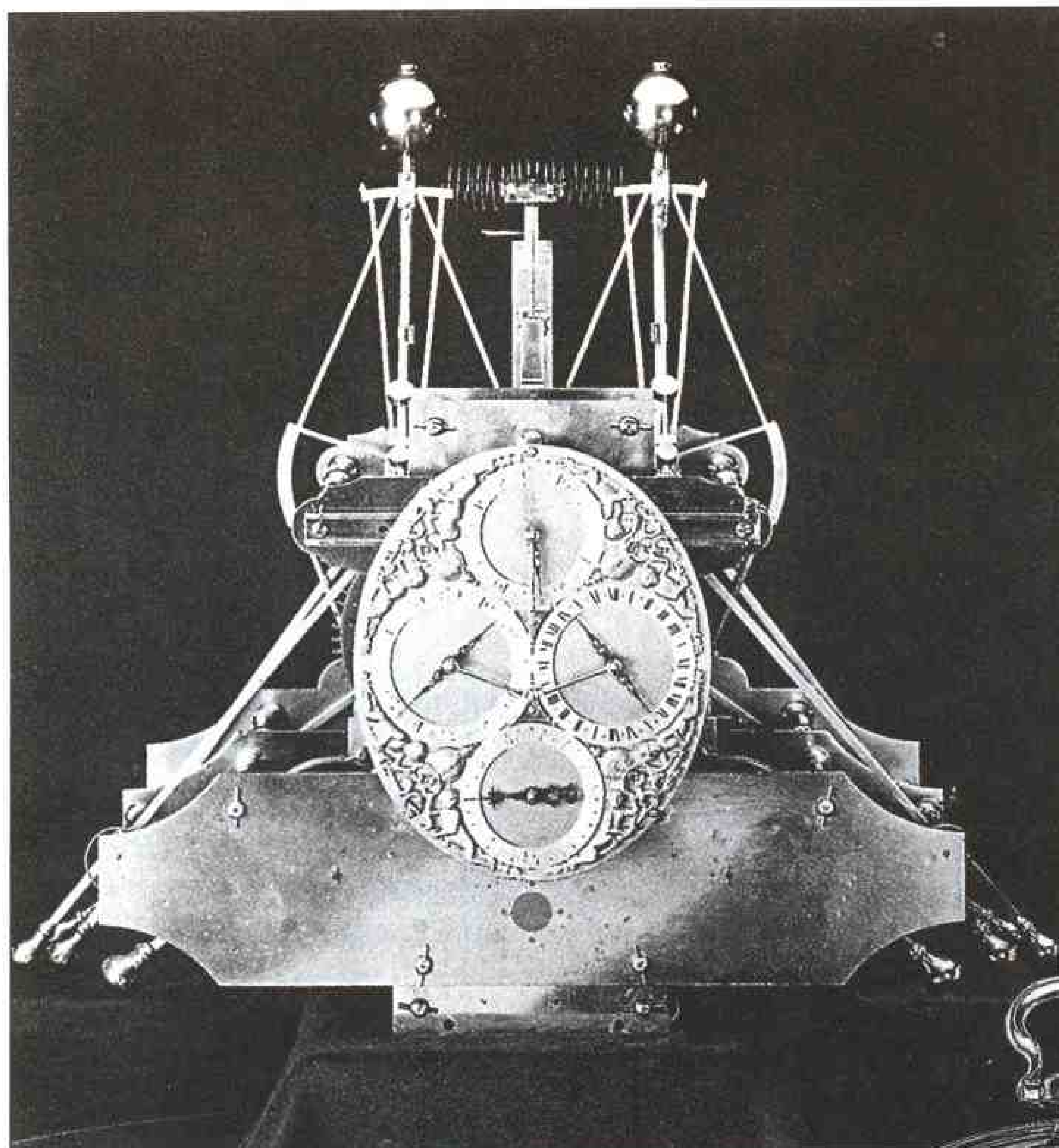
的中叶，巴黎科学院和圣彼得堡科学院都悬赏解决月亮理论的问题。哥廷根的一位教授、应用天文学家迈耶尔（Tobias Mayer，1723 – 1762 年）运用欧拉发明的与此相关的方程制作了月离表，并于1754年晚些时候将其送到了伦敦。七年战争的爆发打断了人们对月离表的检验，迈耶尔在去世前对其月离表做了改进，这些成果最终为他的遗孀从英国议会挣来了3000英镑（而欧拉才从议会得到了300英镑）。他们的成就使得皇家天文学家马斯基林（Nevil Maskelyne，1732 – 1811年）能够于1766年公布最早的航海年鉴（The Nautical Almanac），该历书使得海员们能够很方便地通过这种月亮位置法确定经度。

但就在这个时候，技术的进步提供了另一种更直接的替代方法。1735年，英国钟表匠约翰·哈里森（John Harrison，1693 – 1766年）制作了他的第一架海员时钟（今人称其为H1），这架时钟在当年到里斯本的航行中接受了实地测试，第二年的返航途中又接受了进一步的测试。经过测试它被人们认可，于是经度局提供给哈里森250英镑，让他对自己的发明加以改进。后来的发展就按这种模式进行了下去：不断的改进，不断的资助，一直持续了近30年。

1764年，哈里森和他的H4乘一艘军舰到巴巴多斯。H4不负众望，但议会决

克里斯托弗·雷恩设计了格林威治天文台的这个"有点壮观"的大房间。门口左侧的钟是惠更斯1657年发明的那种摆钟，在这里它们有特别的用途。钟摆被前面的面板遮蔽，摆长有13英尺多，摆弧很小，每2秒钟摆动一次。望远镜用于观察交食之类天象，这需要计时。望远镜架在梯子上，可以从一个窗口移到另一个窗口。象限仪是用来查验时钟的

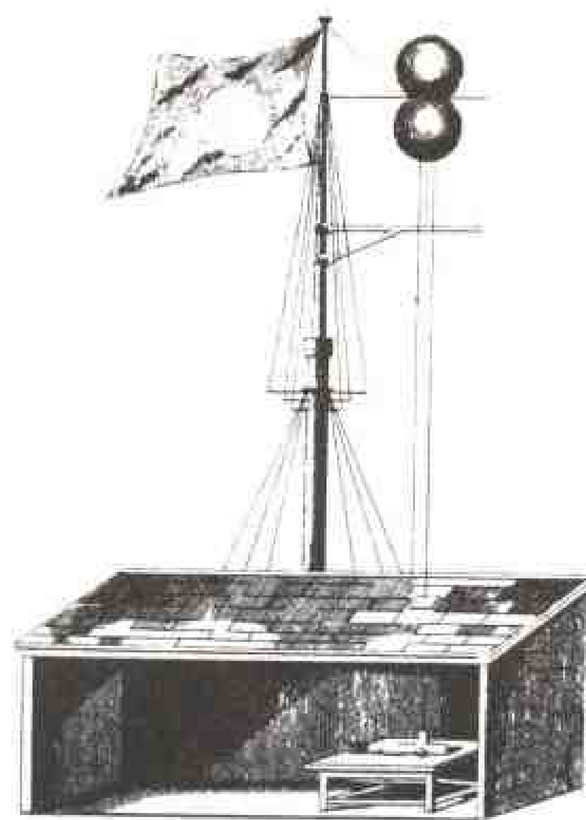




左上图所示是哈里森的第一架海员时钟H1。其长、宽、高各3英尺。因为是用黄铜制成的，故重达72磅。尽管时钟会受到船的运动的影响，但两个天平顶部的球仍然非常和谐地反向摆动。指针指示出时、分、秒，以及每月中的日。右下图是哈里森获奖制品H4，在H4中他开创性地用钻石做支撑。H4的直径约为5又1/4英寸。



定哈里森只能得到10000英镑的奖励，剩下的10000英镑则要等到他制造出H4的复制品并经过测试后才能发给他。到了1773年，年事已高的哈里森终于得到了剩下的那10000英镑，而H4的复制品则被詹姆斯·库克船长（Captain James Cook）在其向南回归线以及南极的航行中（1772－1775年）所采用，库克船长说："我们从未迷失过方向，钟表走得棒极了。"一旦适用的精密时钟能够被制造出来，它们就为解决经度问题提供了一个令人满意的答案。天文台如雨后春笋般地出现在主要港口旁，天文学家们为自己找到了一种新的工作：精确地观测当地的午时，并立即（或在下午1点）敲响报时的大钟，供海员们



罗伯特·沃乔普船长（Captain Robert Wauchope）设计的报时球，该仪器于1829年在英国的朴次茅斯港做了测试。船上时钟所报时间对于确定海上经度至关重要，因此海员会在船停靠港口时检查其时钟的运行情况。根据沃乔普的提议，在达到预先约定的准确的时间时，由一位天文观测者将下面那个球释放，而负责观测的海员就可以据此为其时钟对时。1833年，在格林威治建造了一个这样的报时球。此后各种各样的报时信号很快就在全球各地的港口得到了应用。

为他们的钟表对时。

然而，在陆地，当钟表被由一地运送到另一地时，道路的崎岖不平会打乱时钟的运行。而相邻的两个天文台又急于测出它们的经度差，以改进其观测，但时钟的紊乱使得它们无法测量。这时人们就采用人为的方法发出一种信号——在一个位置适中的山坡上点燃一支火箭，使得两地能够同时看到。例如格林威治和巴黎在1825年就曾通过连续的此类信号联系在了一起。为了这一目的，很多军人从部队里抽调出来充实天文工作者队伍。但是没过多久，电报的发明解决了陆地上的经度问题，就如同精密时钟的发明解决了海上经度问题一样。

太阳系的过去与未来

到了18世纪中叶，基于牛顿原理的“天体力学”取得了许多成就。尤其是新的日行表和月离表对摄动的说明，比过去要精确得多。但仍有两个令人迷惑的反常现象：一个是木星的明显加速和土星的减速，这一现象从第谷·布拉赫时代已为人们所熟知；另一个是哈雷提出的月亮从古代起就一直存在着的明显的加速现象。这些现象的含义至为复杂：如果它们继续这样无限制地发展下去，木星就会沿螺线进入太阳，土星会逐渐离开太阳，而月亮则会落入地球，太阳系将会发生激烈变化，甚至遭遇到毁灭的厄运。

欧拉（他是那些准备接受这场大灾难的人士之一）、拉格朗日和拉普拉斯等人对之做了研究，他们在自己的工作中遇到一个问题：要在这种变化究竟是“周期性的”还是“长期性的”二者之间做出选择。周期性变化看上去就像摆的振动一样，经度、纬度以及离开中心天体的距离等因素会在一个相对比较短的时间恢复到原有数值。而长期性变化则意味着变化是长期的，欧拉一开始把它们理解成是永远朝一个方向的变化。它们影响了天体椭圆轨道的形状和方位：其偏心率、椭圆轴的位置、椭圆轨道面对地球轨道面的倾角、椭圆轨道与黄道相交的交点位置，甚至还可能有与太阳的平均距离等。

1772年，拉普拉斯证明了在高度近似的情况下，两个行星之间的引力对行星与太阳间的平均距离不可能造成持久的单向变化，这年他才23岁。从经过牛顿修正过的开普勒第三定律的角度来看，这意味着这些引力不可能对行星运行周期造成单向变化。拉普拉斯由此得出结论说，木星明显的加速和土星的减速不可能是它们之间的相互吸引造成的——他认为很可能是它们与彗星之间的相互作用造成了这种现象。

1774年，拉格朗日证明，在一级近似情况下，行星轨道与黄道间的夹角及其交点连线方位的长期变化呈现出周期性的振荡，其周期长达几千年。一读到拉格朗日的证明，拉普拉斯立即用同样的方式分析了行星轨道其他方面的一些问题。现在看来，行星相互之间的吸引所导致的其轨道的所有长期变化都属于周期性的

金星凌日

爱德蒙·哈雷1716年指出，金星凌日现象很少，而当它从太阳表面掠过时，天文学家就有机会对天文单位（即日地平均距离，是太阳系内及太阳系范围之外的测量中的基本单位）进行精确测定。下一个这样的"凌日"将发生在1761年，另一次则要发生在1769年。

在测量方法上则需要对在分散得很开的地区所做的观测进行比较。为此许多国家的天文学家都组成了远征队对每次凌日进行观测。最不走运的是法国天文学家勒让提尔（Guillaume Le Gentil），他1760年出发到法属印第安的彭迪彻瑞，英国人在凌日发生前就找到了解决办法，而他在甲板上得出的观点则毫无科学价值。他决定继续留在当地，等待1769年的那次凌日，而届时乌云又遮蔽了天空。他回到法国后却发现自己已被宣告死亡，他的财产已被分割，他的位置已被别人占据。

总的结果令人非常失望，这部分是由于观测者遇到了金星凌日的黑滴效应，金星进入了太阳的黑子区，这让观测者很难对此做出判定。



凌日时的金星（图中挨着太阳弯曲轮廓上的那个黑圈）。看起来金星似乎在一段时间里与太阳的边缘要连在一块了，但由于"黑滴效应"，人们很难确定其相接的准确时刻。

这架携带式天文象限仪是皇家学会专门为观测1769年金星凌日的远征队装备的。它有两个望远镜，一个水平安装，另一个则可以绕轴旋转。仪器借助于安装在其上的水平仪取水平，黄道环（顶部左侧）的反射光照亮十字叉丝，旋转式望远镜通过十字叉丝瞄准所要观测的物体。



皮埃尔—西蒙·德·拉普拉斯

拉普拉斯1749年3月28日诞生于下诺曼底的博蒙昂诺日(Beaumont-en-Auge),一开始他在卡恩大学学习神学,但是一位数学教师把他推荐给了达朗贝尔。拉普拉斯的一篇论文给达朗贝尔留下了如此之深的印象,以至于他安排拉普拉斯在军事学校当了一名数学教授。拉普拉斯一直居住在巴黎,还在政府中担当了一系列职务,直到1827年3月5日去世为止。在法国大革命中,在拿破仑时代以及在波旁王朝复辟时期,他都设法活了过来,而且还红极一时,被授予侯爵。他的半通俗著作《宇宙体系论》(Exposition du système du monde)出版于1796年。该书的出版使得天体力学得到了广泛的读者群,而他的五卷本的《天体力学》(Mecanique celeste,1799—1825年)则综合了欧洲大陆那些曾在牛顿原理基础上研究过太阳系的数学家们(至少拉普拉斯自己就曾这样做过)的成就。

振荡。

1785年,拉普拉斯发现了导致木星做长时间加速运动和土星的减速运动的原因:该变化并非单向的,而是周期性的,其周期约为900年。它不同于那些恒定的长周期变化,因为它依赖于两个相互作用的星球(木星和土星)与太阳之间的位置关系。为了找到这个效应,拉普拉斯不得不对偏心率和倾角的三次方幂继续做了一系列的近似——这需要技巧,但也涉及大量乏味的单纯计算。

1787年,拉普拉斯找到了月亮做长期加速运动的原因。它是一个次要效应,起因于地球的椭圆轨道偏心率的缓慢变小,这使得太阳对月亮的作用有所减小。在地球轨道的长周期变化中,当偏心率停止减小并开始转向增加时,这一加速效应就会发生逆转。(到了1850年,人们发现,拉普拉斯的解释只说明了其中的一半,另一半则应归因于由月亮引起的浅海潮流的摩擦所造成的地球自转的缓慢减小的影响)。

这些发现导致了这样一幅太阳系图景:其内部运动及几何参数仅仅受制于在其平均值附近发生的很小的周期性变化。事实上拉普拉斯相信他已经证明了太阳系是一个稳定的、可自我调节的系统,在这方面它与生物界显然存在的自我调节

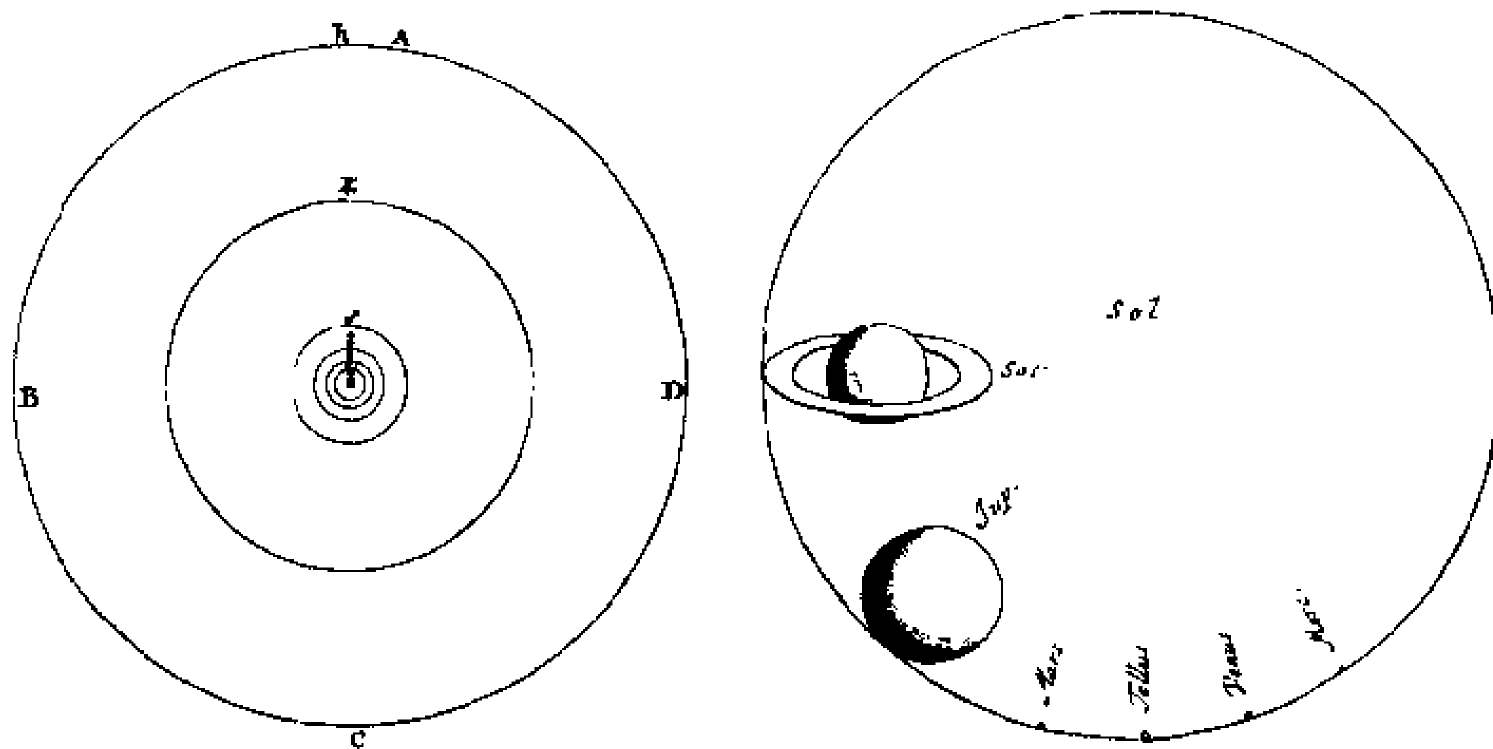
是类似的（我们将会在第188页看到，到了20世纪晚期，人们可以很清楚地认识到拉普拉斯只说对了其中的一部分）。拉普拉斯是在一本才华横溢而又深受读者喜爱的书中描绘了太阳系的上述图景的，该书就是1796年问世的他的《宇宙体系论》。在该书中他还做了一些别的事情：他试图解答太阳系是如何来的这一问题。他认为太阳系一开始有可能是一团巨大的旋转着的星云，随着星云中无数粒子的相互吸引，行星及其卫星从中凝聚了出来。该假说可以说明所有的行星和当时已知的卫星都围绕着太阳沿同一方向从东向西并在同一平面内旋转这一事实。太阳系运动中现存的在平衡位置附近的摄动，应该源于太阳系初始时的混沌状态下遗留下来的空间关系，这可以作为支持该假说的一个例子。

《宇宙体系论》一书被翻译成了多种文字，拥有广泛的读者。拉普拉斯关于太阳系起源的“星云假说”与威廉·赫歇尔当时建立的恒星和恒星系起源的理论相互协调一致，也为达尔文于1859年提出他的生物进化理论准备了条件。我们将于下一章讨论赫歇尔的理论。今天，人们已经接受了星云假说对太阳系起源的解释，关于太阳系理论的一个当务之急是借助于潮和别的引力的相互作用来说明太阳系是如何演化过来的。

拉普拉斯的权威的五卷本著作《天体力学》（1799 － 1825年）描绘了这门学科的研究方法，指出了未来研究所要解决的问题，已经成为天文学家的案头必备读本。特别是美国业余天文爱好者内森涅尔·鲍迪奇翻译的英译本，包含了大量有益的注解，对学者更是极其有用。

“丢失的”行星

在其对上帝这位几何学家究竟是按什么规则对太阳系做出如此之安排进行探究的早期，约翰尼斯·开普勒曾经一度为他所看到的第四颗行星火星和第五颗行星木星之间不成比例的巨大间隙而困惑。他曾一度想到在这个巨大的空间带上可能存在未被发现的行星。一个世纪之后，牛顿认为，该间隙的存在表明，由于木星和土星这两颗巨大行星的引力使太阳系面临崩溃的危险，上帝通过把它们驱逐



左图：取自戴维·格里高利（David Gregory）的《天文学原理》（Astronomiae elementa，1702年）中关于太阳系的一幅插图。图中水星、金星、地球和火星的轨道在圆心处挨得很近，而在火星和木星轨道之间则存在着似乎不成比例的巨大间隙。

右图是克里斯蒂安·惠更斯的《宇宙理论》（Cosmotheoros，1698年）一书中按比例画出的太阳及其行星。与水星、金星、地球和火星相比，木星和土星硕大无比。

到太阳系的外围而设法消除了这一危险（见本书第151页）。

其他相对平凡些的人士则对该间隙是如何产生的提出了一些物理解释。阿尔萨斯哲人J. H. 朗伯（Lambert，1728－1777年）认为木星和土星有可能“夺走”了曾一度占据在该空间带上的行星，而英国达拉谟的一位业余天文爱好者托马斯·赖特（Thomas Wright，1711－1786年），则在一部未曾公开出版的预言书中怀疑在该间隙上曾有过一颗行星，而该行星后来因受到彗星的撞击而毁掉了。

波得定则

认为在该间隙上存在（或曾存在过）一颗“丢失了的”行星的人们，因在18世纪发现了一个数学关系而备受鼓舞。牛津教授戴维·格里高利（1659－1708年）在其1702年的《天文学原理》一书中特别提到，行星轨道半径大致与数字4、7、10、15、52、95成比例。德国的一位大众哲学家克里斯蒂安·沃尔夫（Christian Wolff）在一部书中重新公布了这些数字，这部书正巧被魏登堡（Wittenberg）大学的物理学教授约翰·丹尼尔·提丢斯（Johann Daniel Titius，1729－1796年）注意到了。1766年，提丢斯将著名的法国自然主义者查尔斯·博内（Charles Bonnet）的《沉思自然》（Contemplation de la nature）翻译成德语出版了。在博内的书中，提丢斯插换了一段话。在插换的那段话中，他把格里高利的15换成16，95换成100，从而使得那些数字分别等于4、4＋3、4＋6、4＋12、4＋48和4＋96。

在已知行星中没有一个与上述数列中缺少的4＋24相对应。博内对此评论说：“难道造物主会留下这一空缺吗？绝对不会。”他自己填补这一空缺的方法有些荒唐——是一颗未被发现的火星的卫星。但到了1772年，他的著作译本的第二版被一位年轻的德国天文学家约翰·埃拉特·波得（Johann Elert Bode，1747－1826年）注意到了，当时波得正在对他的极其成功的天文学导论的新版做最后的校验。波得放过了该书关于火星卫星的荒唐假说，而对书中列出的数字关系深感兴趣，并与书中的说法取得了共鸣：“人们能够相信是造物主留下了这一空白的说法吗？当然不会。”波得开始相信在木星－土星间隙带上存在着一颗未曾发现的小行星，该行星距太阳的距离约为4＋24单位（日－地距离为4＋6单位）。

天王星的发现

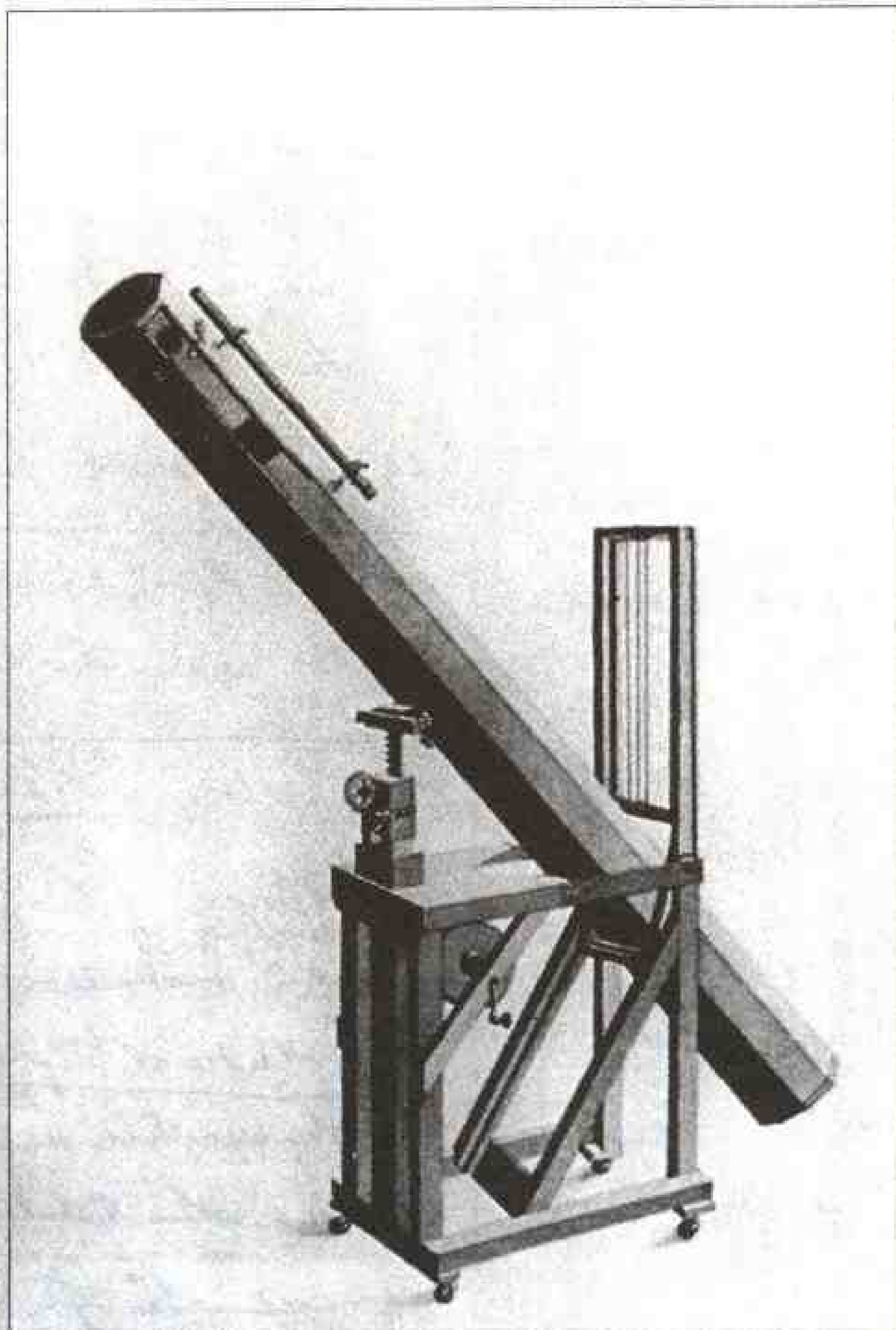
波得书中的结论使得上述数字关系广为人知。到了1781年，任何对波得的疑虑都消失了。这年3月，出生于汉诺威而居住于英国温泉度假胜地巴思的风琴弹奏家威廉·赫歇尔成了历史上发现行星的第一人。他发现的那颗行星最终被命名为天王星，不过这一命名有违他的初衷。

人们惊讶地发现，天王星的轨道与前述数列的下一项4＋192＝196吻合得非常好。哥达的宫廷天文学家冯·察奇（Baron Franz Xaver von Zach，1754－1832年）现在完全信服了该数列，1787年，他对火星－木星间隙带做了搜索，试图在那里找到一颗行星，结果一无所获。1799年，察奇拜访了大量德国同行，通过跟他们的讨论，逐渐形成了组织起来对该问题进行联合探索的想法。1800年9月21日，察奇在著名业余天文爱好者J. H. 施罗特（Schroter，1745－1816年）

风琴弹奏家发现了新行星

威廉·赫歇尔（William Herschel）在偶然看到天王星之前，并没有刻意去寻找新行星。实际上，作为一个自学成才的业余天文爱好者，赫歇尔并不知道"失去的"行星这一猜测。当他用自制的反射式望远镜逐个观测天上的恒星，以使自己对其更加熟悉时，他的兴趣是在恒星，而不是在太阳系。1781年3月13日，他对天空系统的"温习"使其将目光投向了双子座。在那里他看见一个天体，职业天文学家们过去曾误认为该天体是颗恒星，但是赫歇尔的望远镜太好了，他的观测技巧太熟练了，以至于他立刻就能够辨认出该天体的反常性质。他在自己的日记上记道："它非常奇特，要么是星云团，要么是彗星。"

如果该天体属于太阳系，它就会在恒星背景上有比较明显的移动。所以，赫歇尔4天后又把望远镜对准了它。他发现他的怀疑得到了证实，因为该天体的位置已经变动了。既然它不是一颗已知的行星，赫歇尔认为它一定是颗彗星。他的科学界朋友马斯基林将此事通报给了皇家学会和牛津天文学教授托马斯·霍恩斯比。那些天文学家尽管是用专业望远镜进行观测的，但在他们辨识出赫歇尔的"彗星"之前，没有一个人能够在该区域看到任何的反常天体。该天体被证明是颗行星，是历史进入黎明期以来人们发现的第一颗行星。

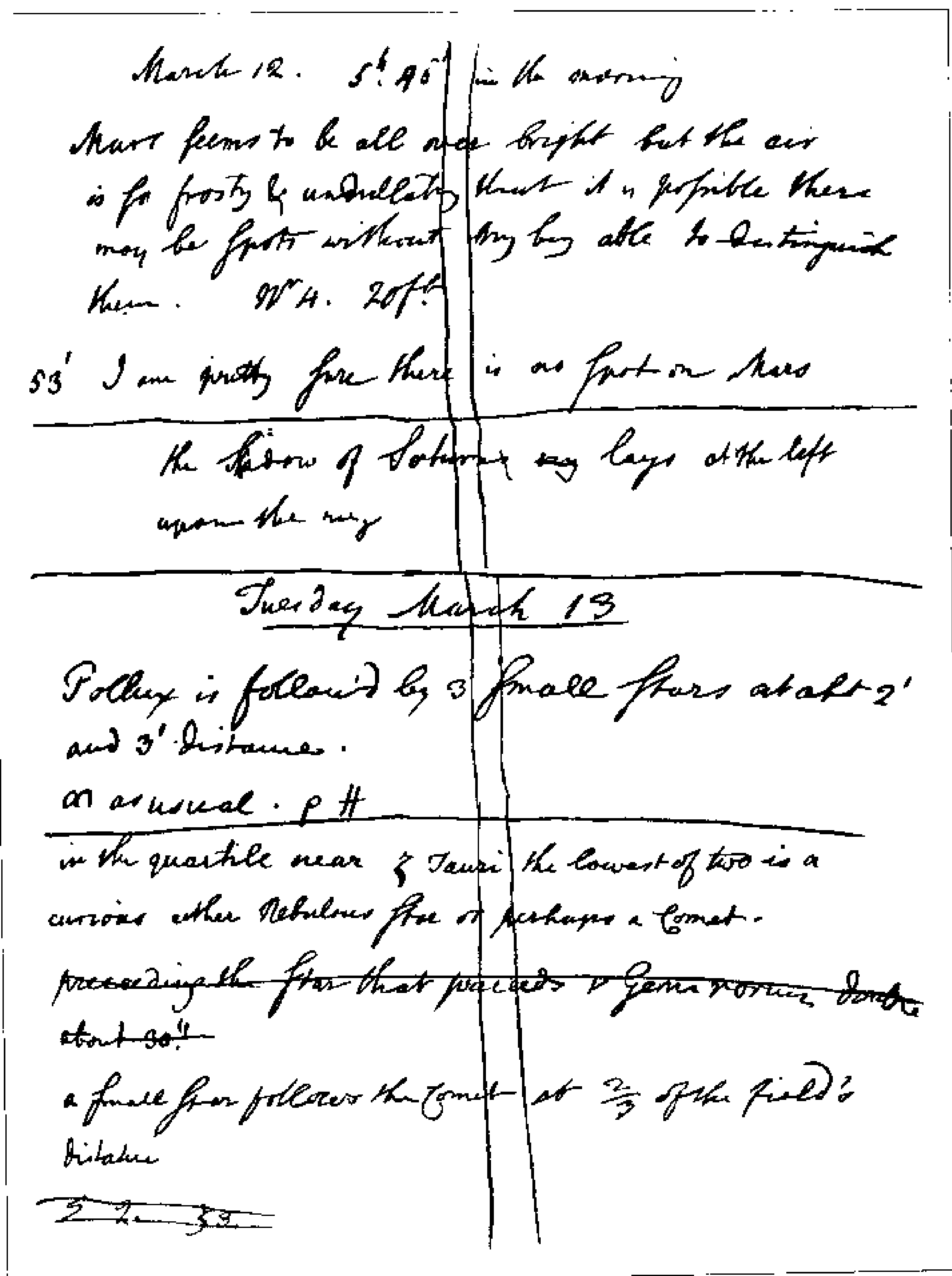


赫歇尔的7英尺反射式望远镜。赫歇尔就是用它发现了天王星。这是牛顿设计的那种形式的望远镜（见第142页），镜筒底部有一个镜子，目镜在顶部旁侧。

的家乡利连霍尔会见了五位天文学家。他们决定谋求全欧洲杰出天文观测者的合作，以组成一支包括24名"太空警察"在内的观测队，给每人都指定黄道带上的一个区域，让其在各自的区域内仔细地寻找新的天体。

小行星的发现

他们的计划被一些突如其来的事情取代了。在那些拟议的合作者中，有一位是巴勒莫的皮亚齐（Giuseppe Piazzi，1746—1826年），他所在的天文台位于欧洲的最南端。在18世纪80年代，伦敦有一位大名鼎鼎的仪器制造家杰西·拉姆斯登，他的生意兴隆，但皮亚齐凭借着居住在伦敦以及对拉姆斯登的工作了如指掌的有利条件，巧妙地说服他完成了一个设计奇特、非常壮观的5英尺高的立式环



March 12. 5h 45' in the morning

Mars seems to be all over bright but the air is so frosty & undulating that it is possible there may be spots without my being able to distinguish them. No 4. 20ft.

53' I am pretty sure there is no spot on Mars

the shadow of Saturn's ring lays at the left upon the ring

Tuesday March 13

Pollux is followed by 3 small stars at abt 2' and 3' distance.

α as usual. ρ #

in the quartile near ζ Tauri the lowest of two is a curious either Nebulous star or perhaps a Comet.

~~preceding the star that precedes ν Geminorum double about 30"~~

a small star follows the Comet at 2/3 of the field's distance

~~5 2 33~~

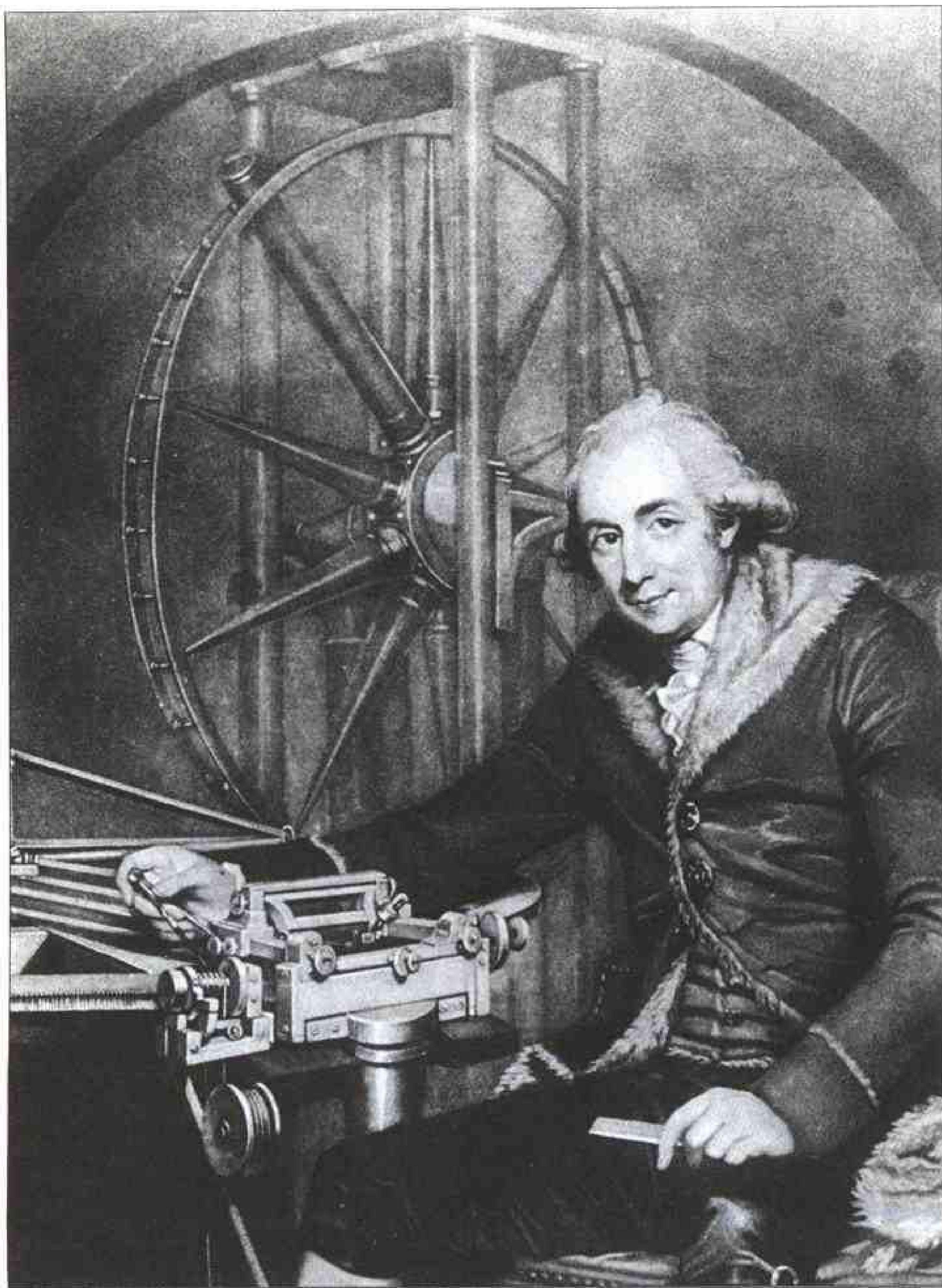
威廉·赫歇尔1781年3月观测日志的一页（划掉的部分表明他妹妹卡罗琳（Caroline）已经精心制作了它的复制品）。对于13号星期四这一天，他记载道："在金牛座ζ附近的四分区内的两颗星中最低的那颗很奇特，它要么是星云团，要么是彗星。"四天后他再次对该天体做了观察，发现它已经移动了，因此它距地球较近。而职业天文学家在那片天区内过去从未观察到任何异常的天体。

圈（见本书第203页）。在世纪之交，人们发现皮亚齐利用该仪器制作了一个星表。该表的精度之高远胜于皮亚齐诸多前任的工作。

在1801年的元旦，皮亚齐还不知道他已经"志愿"成了联合观察组的一员，他像往常一样继续为他的星表而工作。他测量了尼古拉斯－路易·德·拉卡伊黄道带恒星星表中编号为87的那颗恒星的位置，并利用这一机会测量了其前的那颗八等星。他的工作方法认真细致，所以，第二天晚上他再次对那颗八等星做了测量。让他吃惊的是，他发现这颗星好像移动了。在随后的几天里，他对该星的继

续观测证明，它确实移动了。因此，它是太阳系的一员，不是恒星。

皮亚齐把这颗星叫做谷神星，以此表示对西西里的女保护神谷神的敬意。谷神星的位置就在波得定则预期的环带上，一开始，人们认为它毫无疑问是颗大行星，就像天王星一样。但后来赫歇尔却惊讶地发现，即使用他的高倍数望远镜，也很难看到它的行星光斑。他觉得这颗星甚至比我们的月球还要小。更糟糕的是，到了3月，奥伯斯（Olbers）发现了另一个移动着的天体，他把它叫做智神星。赫歇尔对智神星的直径也做了测量，认为它小于111英里。显然，智神星不是行星。为



杰西·拉姆斯登（Jesse Ramsden）是18世纪最杰出的仪器制造家。恒星位置观测所能达到的准确程度取决于仪器尺度的精度。拉姆斯登的成功在于他的刻度机能成功地刻出高精度的刻度。图前部所示是其刻度机，后面就是皮亚齐用来发现小行星谷神星的那个大环圈。

了用合适的术语对新发现的这类天体加以描述，赫歇尔提议把它们叫做小行星。

为了挽救这一“规律”，奥伯斯猜测说，这两个小行星是曾经占据在该空间带上的那颗大行星的碎片。果真如此的话，未来还应该发现别的这些碎片。他的话果然被验证了：1807年，婚神星和灶神星分别被发现了。

如果奥伯斯是正确的，即小行星确实是一颗曾按照波得定则在其轨道上运行的行星的爆炸所造成的碎片的话，那么（至少在一开始）它们的轨道在爆炸处及在太阳的对侧处应该是交错的。但是到了19世纪的下半叶，随着被发现的小行星的数量的不断增加，人们认识到实际情况远非如此。现在人们知道，只有很少一部分小行星直径超过了250千米（150英里），所有小行星的质量加起来也远不及月球，更不要说与行星相比了。

海王星的发现

赫歇尔发现了天王星，皮亚齐发现了小行星谷神星，他们都是在研究恒星的过程中，很偶然地做出了这些发现。到了19世纪中叶，另一颗行星被人们发现了，不过这一次天文学家是在有目的地搜寻特定的天区时找到它的。天文数学家们仅

谷神星的失踪和再现

整个1801年1月，只要天气条件一允许，皮亚齐就去观测他所发现的太阳系这个新成员。1月24日，他给波得和别的天文学家写信，向他们通报了自己的发现。在给波得的信中，他断言那至多是颗彗星，但在给他的朋友、米兰的巴那巴·欧里亚尼（Barnaba Oriani）的信中，他则道出了自己的怀疑：“看来它可能比彗星要强些。”

到了2月中旬，因这颗天体离太阳太近了，无法看到，因此皮亚齐开始尝试在他力所能及的那24次观测的基础上探究该天体的轨道。鉴于当时知道当彗星走到太阳附近时，其轨道的伸长部分非常接近于抛物线，因此皮亚齐决定拿抛物线来试试。他三个一组、三个一组地对其观测数据逐次进行试验，但是没有任何一条抛物线与这些观测数据相符。皮亚齐又想象该星轨道为圆，他发现其半径大约为日地距离的2.7倍，与波得定则所预言的（4+24）/（4+6）位置相符。看来这一定是颗行星，沿一条近似于圆的椭圆轨道运动。但因为人们刚发现它没多久，它只沿着一个弧段移动了很短一段距离，接着就要被太阳光所遮蔽，这就带来了一个问题：天文学家们该如何以足够高的精度来确定它的轨道，以便在它被太阳的光辉遮蔽而又复出后能够重新找到它。

疾病阻止了皮亚齐对其观测数据的进一步的数学分析，他只好在这年4月把他的数据分别寄给了米兰的欧里亚尼、柏林的波得以及巴黎的德·拉朗德，从而把这一问题移交给了欧洲的天文界。幸运的是，欧洲出现了一位数学天才——卡尔·弗里德里希·高斯（Carl Friedrich Gauss，1777－1855年）。到了11月，高斯找到了计算该星轨道特征的数学方法。这个消息一传到察奇的耳中，察奇立即开始了搜索这颗失去了的行星的工作。就在当年的最后一天的晚上，他找到了这颗星，它正好就在高斯所预言的位置上。

成百的小行星

1807年，人们发现了灶神星。在此后很长一段时间里，人们没有再找到新的小行星，这使得天文学家们很快就厌倦了这种搜寻。后来，德国的一位离任邮政局局长K. L. 亨克（Hencke）重新唤起了人们对搜寻小行星的兴趣。亨克是一位具有非凡奉献精神的人物，他于1830年开始这项工作，默默工作了15年，然后才得以享受成功的欢乐。他于1847年发现了另一颗小行星，这鼓舞了观测者们继续进行新的搜寻。

到了1891年，人们发现了三百多颗小行星。之所以能够发现这么多的小行星，主要还是得益于照相术的应用。海德堡的马克思·沃尔夫（Max Wolf）使他的照相机能够追踪天球的旋转，从而实现对一大片恒星场进行长达几个小时的曝光。在最后的照片上，恒星呈现出点状图像，而小行星则由于它们在这段曝光时间之内的移动而像一根小棒。

今天，人们已发现了大量的小行星，其中大约有两千颗在围绕太阳介于火星和木星之间的这条"行星带"上运动，它们的轨道已经被人们完全掌握。它们的体积很小，只有少数几个小行星的直径超过几十英里。所有小行星的质量加起来也只有月球质量的一小部分。

仅依靠他们手中的笔和纸以及他们关于牛顿力学的知识，就确定了该天区。

在天王星于1781年被发现后不久，波得就发现图比亚斯·迈耶尔（Tobias Mayer）在1756年曾记载过该星的位置，而约翰·弗拉姆斯提德更是早在1690年就记述了它，不过他们都把它当成了一颗恒星。这些附加资料使得他的朋友费克斯米尔诺及他人能够确定其椭圆轨道的特征，计算出它未来的位置表来。

可是，天王星不久就开始偏离其预期轨道。到了1790年，巴黎的数学家J.-B. J. 德朗布尔（Delambre，1749－1822年）公布了他编制的天王星运行表，该表看上去与观测结果吻合得相当好，这使问题得到了解决。但是，到了19世纪20和30年代，天王星轨道理论再次遇到了麻烦。

面对新的麻烦，各种各样的解释如雨后春笋般涌现了出来，其中一些立即遭到反对——例如该行星受到宇宙流体的阻滞，它有一颗质量很大但又不可见的卫星，它在被发现时正在受到一颗彗星的影响，等等。但在这些解释中，有两种却值得考虑：也许引力定律在大距离情况下会偏离平方反比形式；或者天王星受到了其外围尚未被发现的一颗行星的吸引。在18世纪中叶，人们一次又一次试图修改引力定律，但无论如何努力，该定律总是坚如磐石。这样，人们产生了一种共识：天王星的反常行为是受到一颗未被发现的行星的作用的结果。

到了1845年，巴黎天文台的勒威耶（Urbain Jean Joseph Le Verrier，1811－1877年）对天王星的运动做了仔细观测。勒威耶是一位精通牛顿力学的技术专家，他在当年11月向巴黎科学院提交了他的第一篇关于这一主题的论文。这篇论文的复制本很快就送到了格林威治的皇家天文学家埃里（George Biddell Airy，1801－1892年）手中。第二年6月，勒威耶又提交了第二篇论文。他在论文中提出了一个假设：那颗未被发现的行星就在波得定则所预言的那个位置。在一大段

长长的论证之后，勒威耶得出结论说：该行星现在所处经度从太阳处看一定在325°之内。

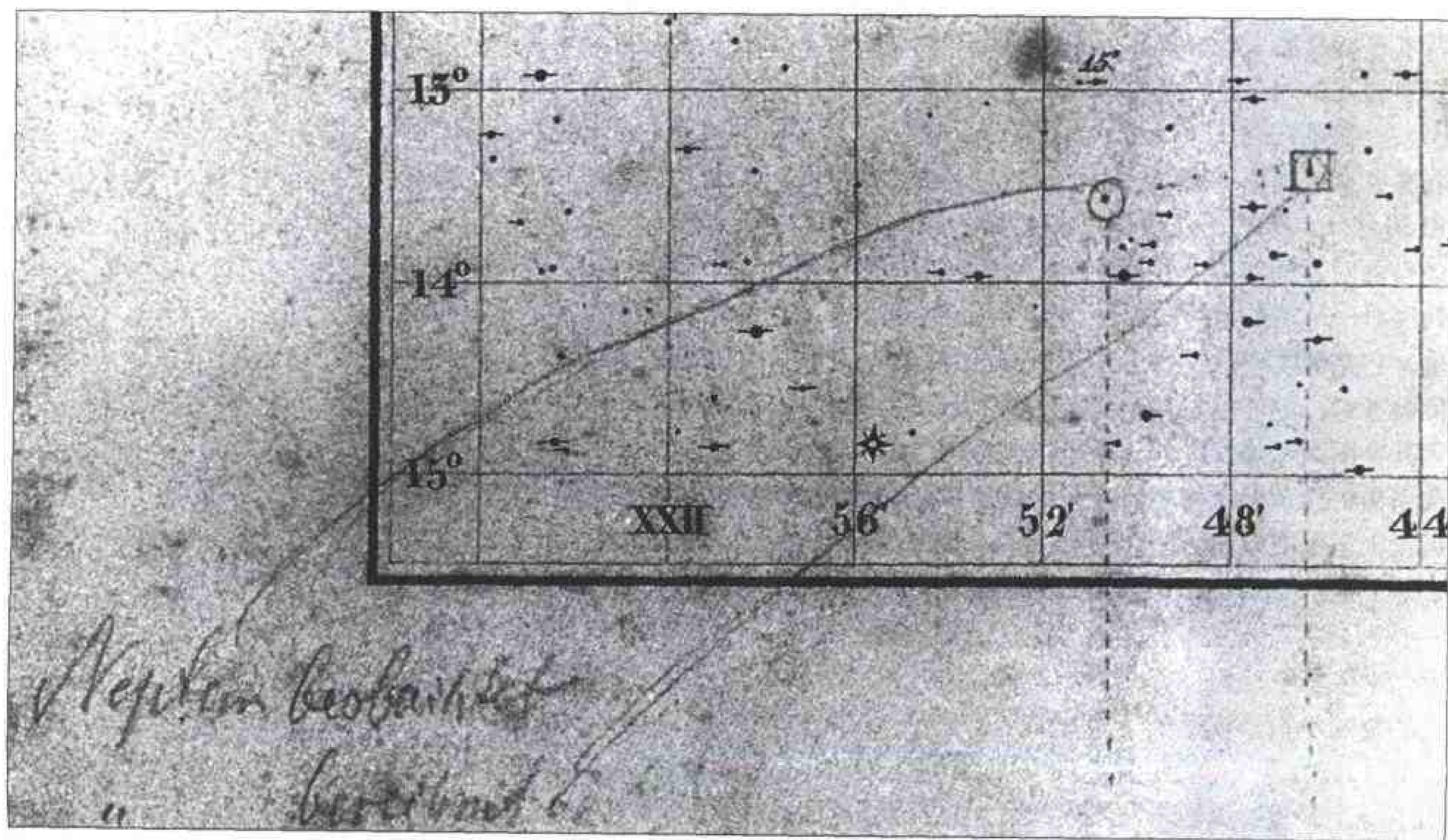
与此同时，一位不为勒威耶所知的年轻的剑桥毕业生约翰·科奇·亚当斯(John Couch Adams, 1819-1892年)也在探讨这一问题。他也假定该行星遵循波得定则，并于1843年10月得到了该行星位置的近似解。由于教务繁忙，他直到1845年9月才得出更精确的结果。他推算的该行星在10月1日的以太阳为中心的经度为323° 34′。

剑桥大学的天文学教授詹姆斯·查理斯(James Challis, 1803－1882年)给亚当斯写了一封推荐信，亚当斯手持推荐信去找埃里，希望向他呈上自己的分析。但是由于接踵而来的事情的干扰，他未能同埃里交谈，但他给埃里留下了自己论文的摘要。

第二年夏天，勒威耶的论文也寄到了。文中对该行星所处太阳经度的预期与亚当斯完全相同，这使埃里动心了，他要赶快行动起来。在他看来，搜寻未知行星不是受到公费资助的皇家天文台的任务，于是他劝查理斯在剑桥做这件事情。查理斯实际上已经这么做了，但不幸的是他没有该天区精确的星图，这意味着他只有一种方法去辨识该行星——这一天区的偶然过客，就是重新检查该区域近期的天象，看在这段时间间隔内是否有“星”的移动。查理斯把这当成一种零活，毫无紧迫感可言。

这种拖延影响到了亚当斯的优先权，因为勒威耶此时已经说服了柏林天文台的天文学家去进行搜寻，并且这些天文学家很走运，他们找到了一张相关星图，这

这是人们发现海王星时所用的星图。1846年9月23日，柏林天文台的加勒和他的学生、助手达勒斯特开始搜寻勒威耶所预言的那颗行星。搜寻一阵之后，加勒一无所获，这时达勒斯特提议将该星区与所用星图加以比较。在一个抽屉里，他们发现了柏林科学院的新的星图集里的相关内容。该图集尚未向国外发行。在勒威耶预期的位置旁边(画方框之处)，加勒发现一个星体(画圆圈之处)从星图上消失了，这证明了它就是那颗行星。



勒威耶



勒威耶1811年3月11日出生于法国的诺曼底，他的父亲是当地的政府官员。勒威耶从1831年到1835年在巴黎的工艺专科学校学习，在经历了一段短暂的化学生涯之后，他于1837年在学校获得了一个天文学方面的低级职位。他完全沉浸于法国"天体力学"的巨大传统之中，首先在太阳系的稳定性方面拓展了拉普拉斯的工作，然后又研究水星轨道，以及与辨识周期性彗星相关的问题。1845年，他受巴黎天文台台长阿拉果的邀请，开始探讨天王星为什么会偏离其正常的行星轨道这一问题。他预言是一颗未知的行星对天王星的吸引而导致了这种现象。他的预言在第二年秋天就被证实了。

勒威耶继续研究别的行星轨道的大量细节。1854年，他接替了阿拉果的位置，成了巴黎天文台的台长。但是他的专制作风导致了他于1870年被解职。在其继任者去世之后，他于1873年重返台长宝座，但这一次他的权力被削弱了。1877年9月23日，他在巴黎去世。

张星图是柏林科学院尚未公开发表的新的星图集的一部分。他们于1846年9月23日晚上开始搜寻，并在当天夜晚就发现了该星图上所没有的一颗"星"，这就是那颗丢失了的行星。

1846年对海王星的发现是牛顿力学成功的巅峰：两位天文数学家坐在他们的桌子旁，通过天王星与其预期轨道的偏离计算导致这一现象的原因，最后精确地找到了罪魁祸首的下落。而在此之前，人们从未想到过这颗行星的存在。

失败的祝融星探索

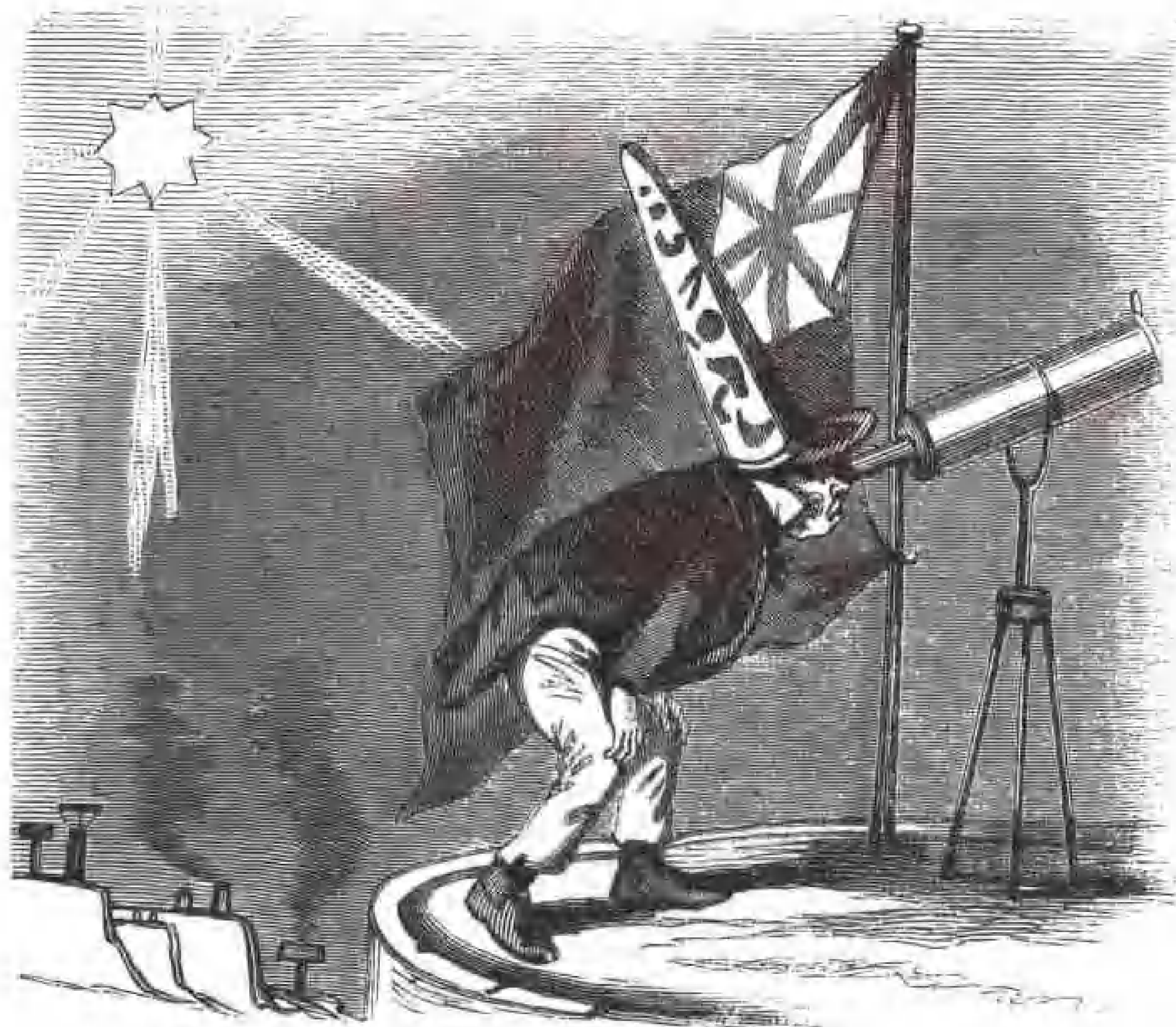
在1846年，天体力学看来成了科学的皇后。它具有最成功的数学化方法和最精确的预言。但是，它却命中注定要受到一次沉重的打击。

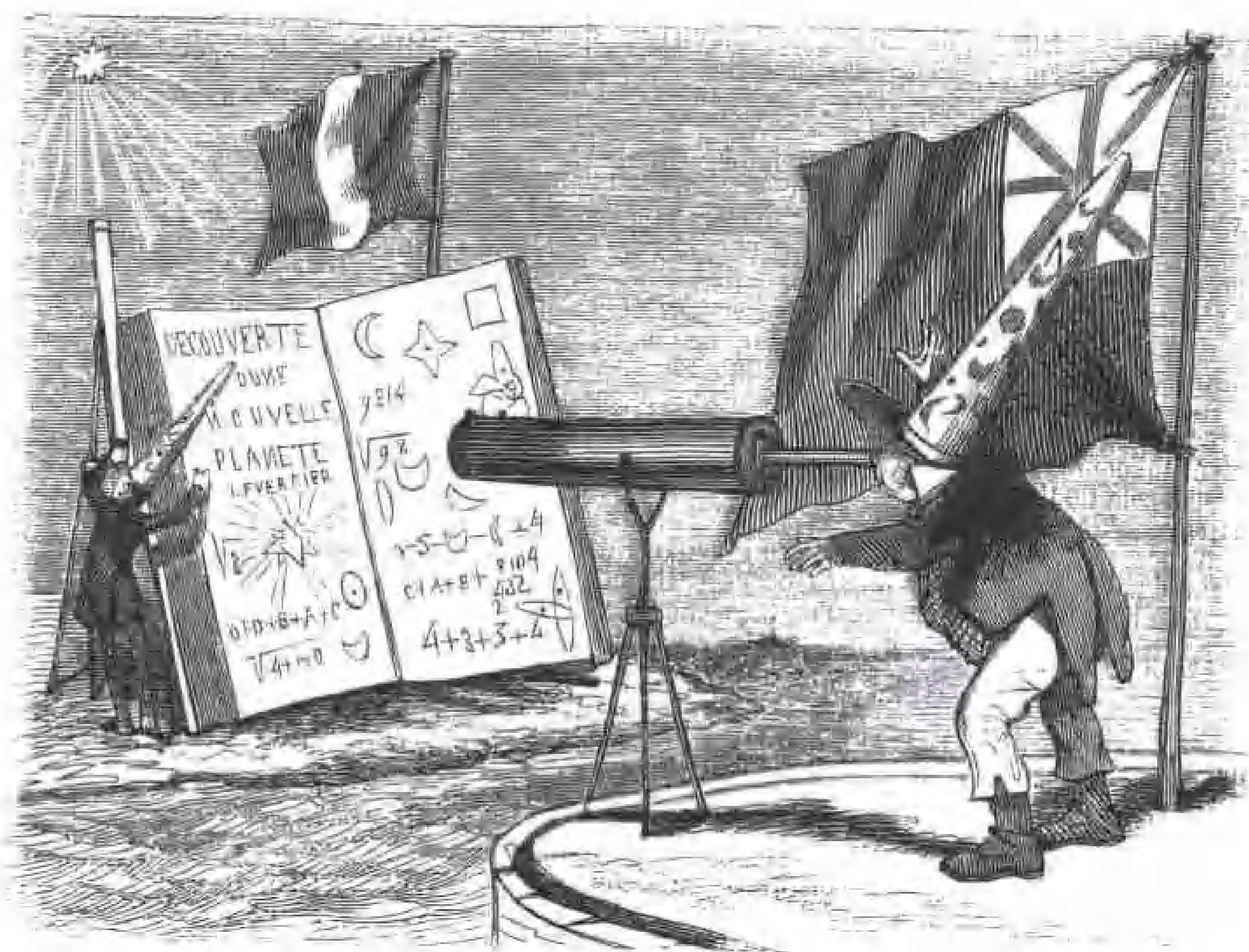
与天王星类似，水星的轨道运动也有一些难以解释之处：其近日点在经度方面的移动比预期值一个世纪要快大约一弧分。

这样微小的差异——100个世纪才差1度——应当引起人们的关注，因为它出人意料地对数学家们用牛顿原理来解释行星运动所取得的巨大成功提出了挑战。勒威耶很自然地想到是否又是一颗未被发现的行星造成了这一差异，不过这颗行星的轨道应该在水星轨道的内侧。1859年9月，他发布了自己计算的结果：一颗与水星尺度相仿的星球在距太阳一半距离的位置上，会使水星产生这种提前量。在该位置上的小行星环也会产生类似的结果。

好运似乎又接踵而至。这一年的早些时候，法国奥格雷斯城一位叫做列斯卡

巴黎的查姆所做的两幅漫画。勒威耶在预测海王星位置上的成功使英国的天文学家们产生了一种怨恨感：亚当斯做出了类似的预测，但却被缓慢的搜寻步伐以及缺乏该天区最新星图的事实耽误了。英国人提议由亚当斯和勒威耶分享这份荣誉，这个提议在巴黎理所当然地遭到冷遇。在第一幅漫画中，我们看到亚当斯在一个绝对错误的方向"搜寻勒威耶先生的行星"，第二幅则是"亚当斯先生在勒威耶先生的报告中找到了那颗新行星"。





保尔特（Lescarbault）的没有名气的医师看到了一个天体从太阳表面越过，他认为这就是那颗水内行星。他当时对此没有发表任何意见，但到了12月，他听说了勒威耶的预言，于是就把此事写信告诉了勒威耶。勒威耶立即赶到奥格雷斯城，医生的真诚使他得到了极大的满足，他把这颗星起名为祝融星，并计算出其周期不到20天。

1876年，祝融星预期又要从太阳的圆面上经过，但进一步的考察表明，它只是个太阳黑子。这一次，大约二十来个观测站对这颗假想的行星做了观测，它们的资料被汇总在了一起。勒威耶认为其中的5个是可信的。在这些观测的基础上，他计算出了该行星有可能于1877年3月和1882年10月再次经过日面。但实际上，届时什么也没有发生。

尽管水星的近日点进动这一证据比以往任何时候都要强烈，但利用交食进行的搜寻却一无所获。到了19世纪末，祝融星被认为是一颗不存在的假冒行星，水星近日点的进动重新被认为是天体力学尚未解决的一个谜，是牛顿力学那似乎无穷无尽的成功事例中一个少见的例外。但是命运跟人们开了个大玩笑，本来人们期待着它给牛顿力学带来另一个大胜利，谁知结果却适得其反。我们将在第八章中看到，阿尔伯特·爱因斯坦于1915年证明，他的建立在对牛顿力学基本概念的重新评价基础上的广义相对论所要求的水星近日点的进动量与实际观测值几乎完全一致。

水星的这种令人困惑的进动终于得到了解释，但这种解释依据的不是牛顿原理。波普赞扬牛顿的诗句需要加以修改：

> 秩序不复存在，魔鬼嚎叫，一片混乱，
> 上帝说，让爱因斯坦去吧，于是秩序井然。

20世纪的天体力学

尽管有了爱因斯坦革命，但天体力学的大部分工作——例如人造卫星轨道的标绘——仍然是在牛顿方程的基础之上进行的。此类计算不可避免地只是一种近似，但是在大多数情况下，牛顿理论给出的结果已足够用了。

然而，在需要精确计时的情况下，事情就并非如此了。直到20世纪中叶，人们仍然用“平均”太阳日作为时间单位，但是由于认识到了潮汐的摩擦在减缓地球自转方面的作用——且不说地球形状的改变对地球自转速率的影响，这一标准显然就过时了。现在，在为人们提供时间标准方面，原子钟取代了地球的自转。然而，就像世界上所有的时钟一样，原子钟也存在于一个加速参照系中，也有爱因斯坦广义相对论所预言的那种变动。因此，天体力学家们在计算行星和人造卫星的位置时，必须在计算机程序中加入与相对论效应有关的内容。

在20世纪晚期，天体力学不得不面对另一个挑战。这次挑战也许比爱因斯坦的挑战更令人困惑。拉普拉斯提出的天体力学观念被人们广泛接受，这种情形一直持续到最近。这种观念认为，人们对天体的预测可以与精确到与观测完全一样。

如同拉普拉斯所指出的那样，一个精灵如果精确地知道任一时刻宇宙中所有物体的位置和速度，而它的大脑能够完成必要的计算的话，它就能够知道整个宇宙的过去和未来了。人类的天文学只不过是此类知识的一个"暗淡的"影像而已，是它曾经呈现的那种影像。如果人们对行星位置的观测达到了一定的精度，那么人们对其未来位置的预测也能达到同样的精度。

19世纪90年代，法国数学家亨瑞·庞加莱（Henri Poincare，1854－1912年）为天体力学问题引入了一种新的思考方式。庞加莱不是把目光集中在那些看上去通过对方程的无穷多项取近似值的传统方法可以解决的问题身上，他运用准几何学方法对一种传统说法做了测试，该说法认为方程的参数的微小变化会导致解也发生微小变化。可是，他发现在许多动力学系统中，初始条件的微小变化能够导致最终结果的巨大变化。

随着近几十年计算机时代的来临，人类拥有的计算能力大为增加，要对这样的动力学系统进行探讨已经成为可能。例如，考虑一个系统，该系统包含一个单摆，悬点连在一个振子上，如果在摆的固有频率和悬点所在处的振动频率之间有一个比较接近的拍，那么系统行为对初始条件将变得无限的敏感。既然对初始条件的测定总有一定的精度限制，因此系统的运动将不可预测，即使从理论上讲它是完全确定的。在这里，拉普拉斯假定的在决定论和可预期性之间存在的那种联系荡然无存，我们所面临的是一种被称作"动力学混沌"的局面。

最近，人们已经知道，太阳系的内层行星水星、金星、地球、火星以及外行星冥王星就提供了一种动力学混沌的例子。例如，地球的摄动与其周年运动之间处于近似共振状态，这与上述单摆的运动非常相似。从观测角度来说，我们无法完全精确地（即以无穷高的精度）探明行星的位置，这样，对于内行星以及冥王星来说，初始范围的不确定性将会随着时间的增加而飞跃增长。利用计算机进行的计算表明，地球初始条件的变动所导致的不确定性每500万年增加3倍，即是说，在测定初始条件时，如果存在10米的误差，1亿年后它所带来的不确定性将达到100万千米。

行星运动存在着的这种"混沌"现象，使得人们以前所有证明太阳系稳定性的努力基本上都付之东流了。处于动力学混沌态的系统都对系统的意外摄动格外敏感，这意味着我们生活的世界比拉普拉斯所想象的要不确定得多。

天体力学所梦想的那种确定性一去不复返了，虽然如此，它仍然使人们对未来的探究充满憧憬。天体力学现在的任务是探明行星的"混沌"的具体含义，在目前所揭示的限度之内对其做出精细的预言，以及描绘出太阳系及其亚系看上去真实有理的演化细节。

（关增建译）

第七章 恒星宇宙的天文学

1833年，约翰·赫歇尔出版了他的《论天文学》(A Treatise on Astronomy)，这是一部为业余爱好者写的介绍性的天文学著作。尽管赫歇尔当时已经超越了太阳系的限制，在对宇宙的了解方面是世界权威，但他仅仅拿出了其中的一章来写恒星研究，因为当时天文学关注的仍然是行星和彗星这些太阳系的家族成员。而自从笛卡儿描绘了无限宇宙的图景，指出宇宙没有中心、没有边界，太阳只是我们身边的一颗恒星，其他恒星则是距我们十分遥远的太阳之后，到此时已经有近二百年了。

在这200年中，恒星继续扮演着它们传统的低下角色，为人们测定太阳系成员运行的位置提供参照点。它们的躯体在空中不能自由移动，人们对之缺少兴趣，也在情理之中。它们离开我们的距离十分遥远，以至于我们从地球上看上去它们的移动距离非常微小，小到即使在17世纪末，也没有发现任何一颗恒星的位置与古代的最早的星图相比有任何的改变。这些恒星太遥远了，看上去也太稳定了，所以不能引起大多数天文学家的兴趣。

恒星天文学之所以现在变得重要，仅仅是由于19世纪下半叶天体物理学的发展。今天，摆锤摆到了另一侧，太阳系不再是人们关注的重点。过去，只有少数早期的天文学家——其中大部分是业余爱好者——有勇气探索遥远的恒星，现在人们已经知道，他们的开拓性工作对于未来天文学的发展有着巨大的意义。

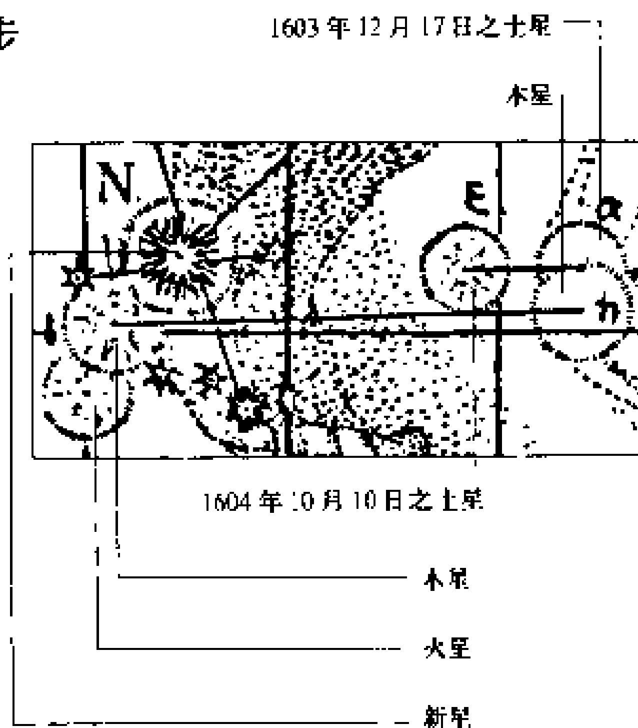
恒星宇宙中太阳的邻居

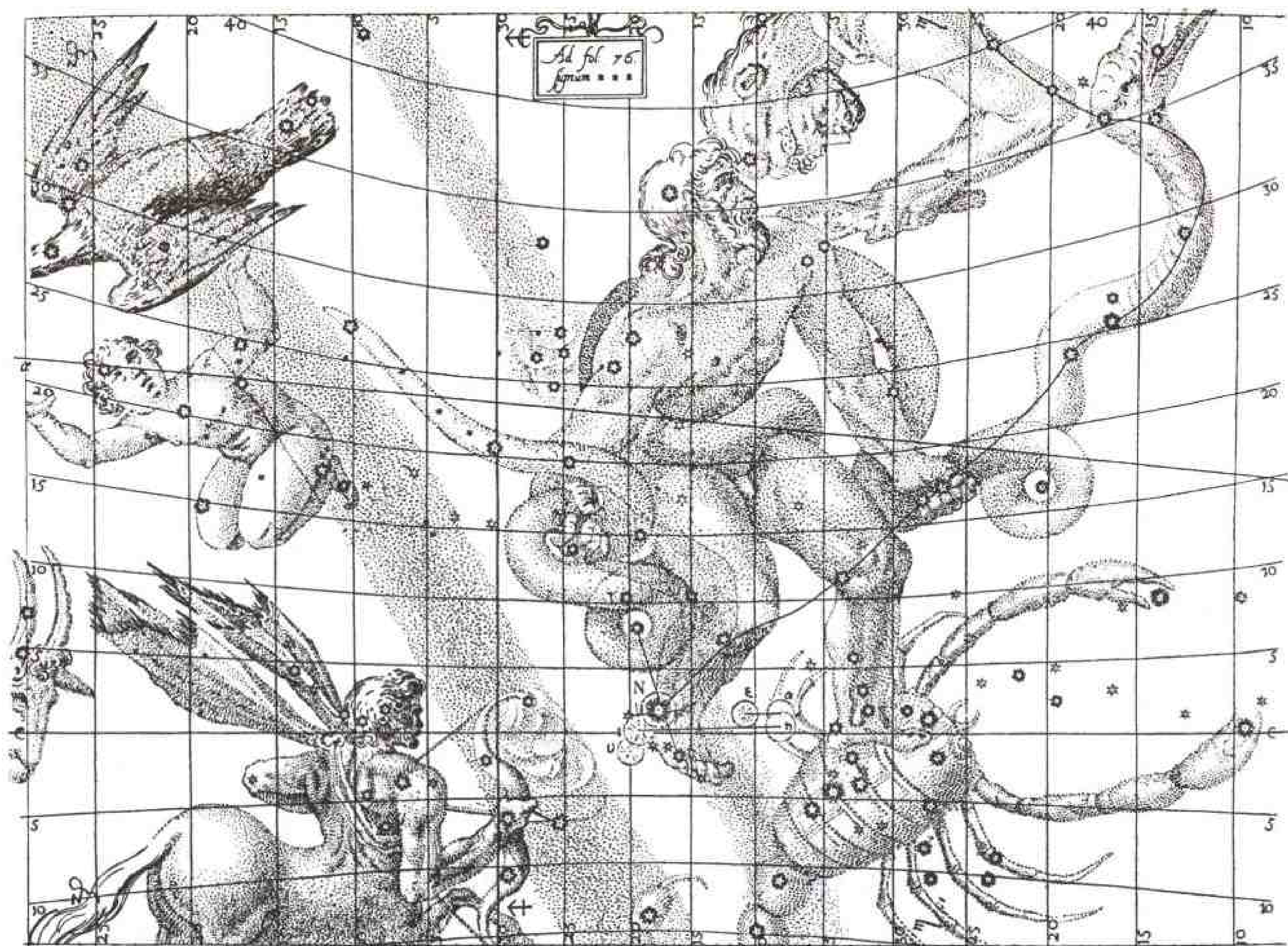
要接近恒星世界，有两种方法：一种非常大胆，认为应当把宇宙作为一个整体加以理解。这种意见常常把天文学与神学混在一起；另一种喜欢一步一步来，先从太阳系出发，探寻恒星中离太阳最近的那些邻居。天文学家们究竟接受这两种方法中的哪一种，要取决于他们的气质。我们就从这些比较谨慎的后者的工作开始我们的讨论吧。

亮度变化的恒星

古代和中世纪的天文学家们认为，恒星不管是亮度还是位置都是一成不变的。这种观点听起来让人觉得有些奇怪，因为有些恒星的亮度存在着周期性的变化，这些变化不难用肉眼发现——只要你知道向哪里看。更重要的是，只要你知道存在着这些有待观察的变化，你就能发现它们。这些变化之所以能长时间不被人们发现，是因为大自然的安排使得恒星亮度变化的强度不足以引起早期观察者的注意。

本书第188页图所示诸天体的细节。紧临着蟹状物体的左上方是两个重叠环，代表木星和土星在1603年(格里高利历的12月17日)发生的大合。到了1604年的10月10日，木星向左进入了蛇夫座，接近了火星，土星也向左移动，但移动的距离较短。就在当天，在三颗行星的中间，一颗新星突然爆发了。





开普勒星图中1604年新星及其附近的行星位置图。

1572年出现的新星（第谷新星，见本书第92页）迫使天文学家承认恒星的亮度能够发生变化，而且它也确实发生了。特别是，仅仅一代人之后，1604年，大自然又给人们上了难忘的一课：第二颗类似的新星（开普勒新星）爆发了。

当时，这件事情的星占学意义看起来非同小可。木星和土星是已知行星中在恒星背景上运行最慢的，因此它们的相合（木星追上并越过土星的时刻）在所有的行星相合中也次数最少。在1603年12月，在黄道带上发生了一次行星的相合，这次相合伴随着火元素这个在诸元素中最富预示性的元素的参加。这在8个世纪以来还是第一次。到了第二年秋天，木星和土星重又聚合，而且还有运行第三慢的另一颗行星——火星的参加。这时，在这三颗行星的中间，在这个最富于星占学意义的地方，一颗光芒四射的新星出现了。

面对这种情况，一些人认为世界末日到了，另一些人则期待着土耳其帝国被推翻，还有一些人则认为这预示着新的大统治者的出现："新星当空，新王当政"。约翰尼斯·开普勒是布拉格的皇家数学家，他很快赶制出了一本关于这颗星的小册子。两年后，他出版了一部名为《论新星》的著作，书中收容了涉及这颗新星的所有问题，从天文学的到星占学的都有。

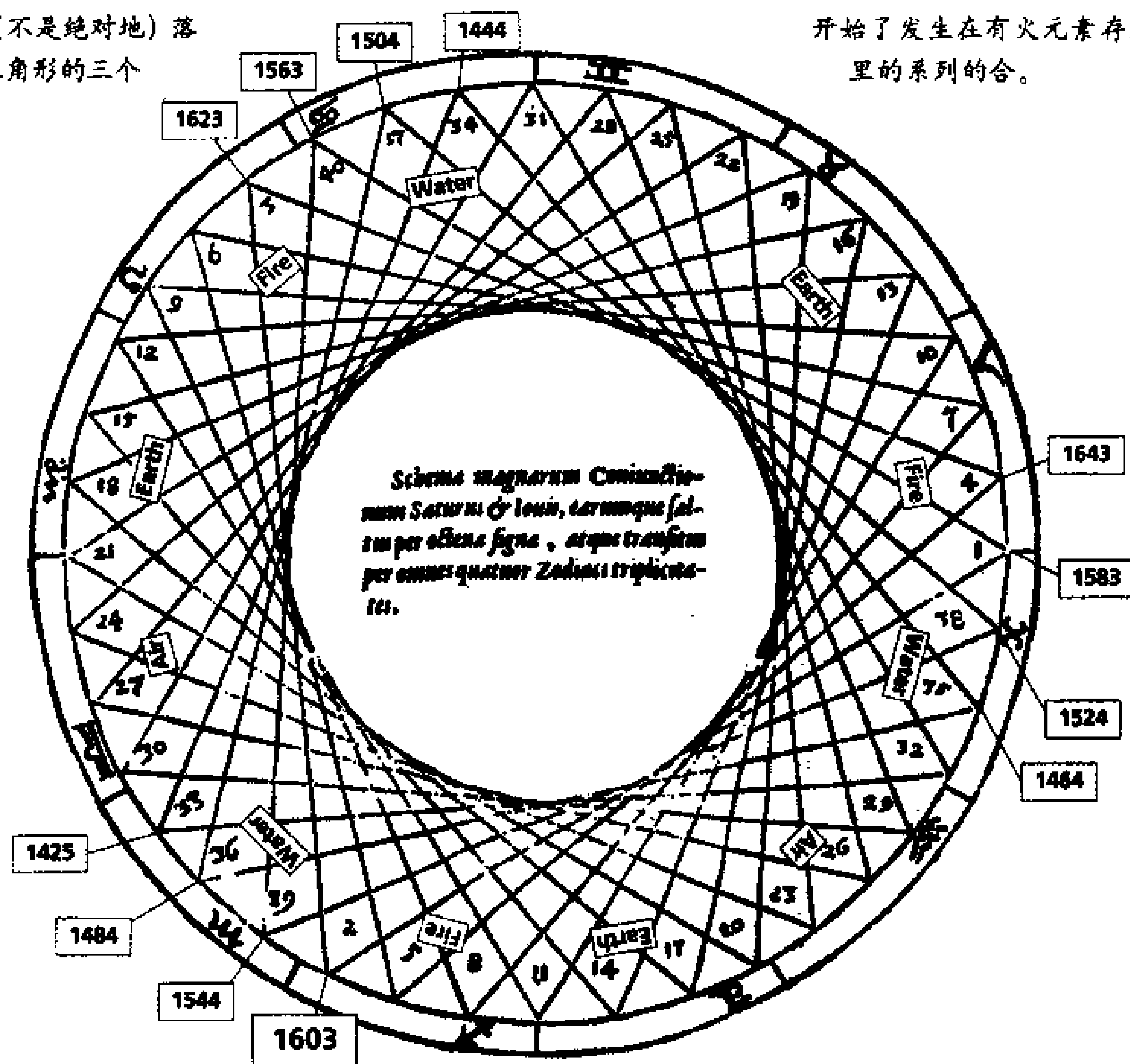
大合星占学

木星在黄道上12年转一圈，土星则要30年，因此它们的“合”（即木星赶上土星），大约二十来年发生一次。正因为这种现象很罕见，所以它们的“合”被认为是大合。

在下一次合之前的20年，土星沿着黄道带转过2/3的弧段，在接着的20年里，转过另一个2/3的弧段；在又一个20年里，它又转过了2/3的弧段。到了此时，它已经转过了两周，回到了上次合的位置附近。

这样，相继发生的3次合就绕着天空粗略地形成了一个等边三角形。在黄道十二宫中它们或者落在第1、5、9宫，或者落在第2、6、10宫，等等。每三个一组的这些宫被叫做“三分”（trigon，意即三角形），每一个三分都伴随着四元素中的一个元素，火元素所在之三分最富有预示性。

实际上的合每200年左右就从一个三分移动到另一个三分。这样，每800年之后，合就又重新回到它原来的那个三分。正巧在基督诞生的时候，合进入了有火元素所在的那个三分（现在有些人利用这一事实来解释伯利恒之星）；到了1603—1604年，在经历了8个世纪的两轮循环之后，象征着同样预兆的事情再次发生了。



开普勒在其《宇宙神秘》（1596年）一书中所画的一幅插图，意在说明“大合”的理想形式（附加有日期和元素）。任何一个相继发生的三次合都近似地（不是绝对地）落在一个等边三角形的三个顶点。15和16世纪相继发生的合都落在水元素所在的巨蟹、天蝎、和双鱼座上。1583年的一次合最后发生在双鱼座（圆心右侧）。1603年的合（底部左侧）不是在天蝎座，而是在人马座，它与白羊座和狮子座构成一个存在有火元素的三分——从而开始了发生在有火元素存在的三分里的系列的合。

第谷、开普勒及其同时代人非常幸运：天文学家们等待银河系出现另一次新星，到现在一直等了近四百年，可它们总不出现，就像天空的烟火都成了机密一样。

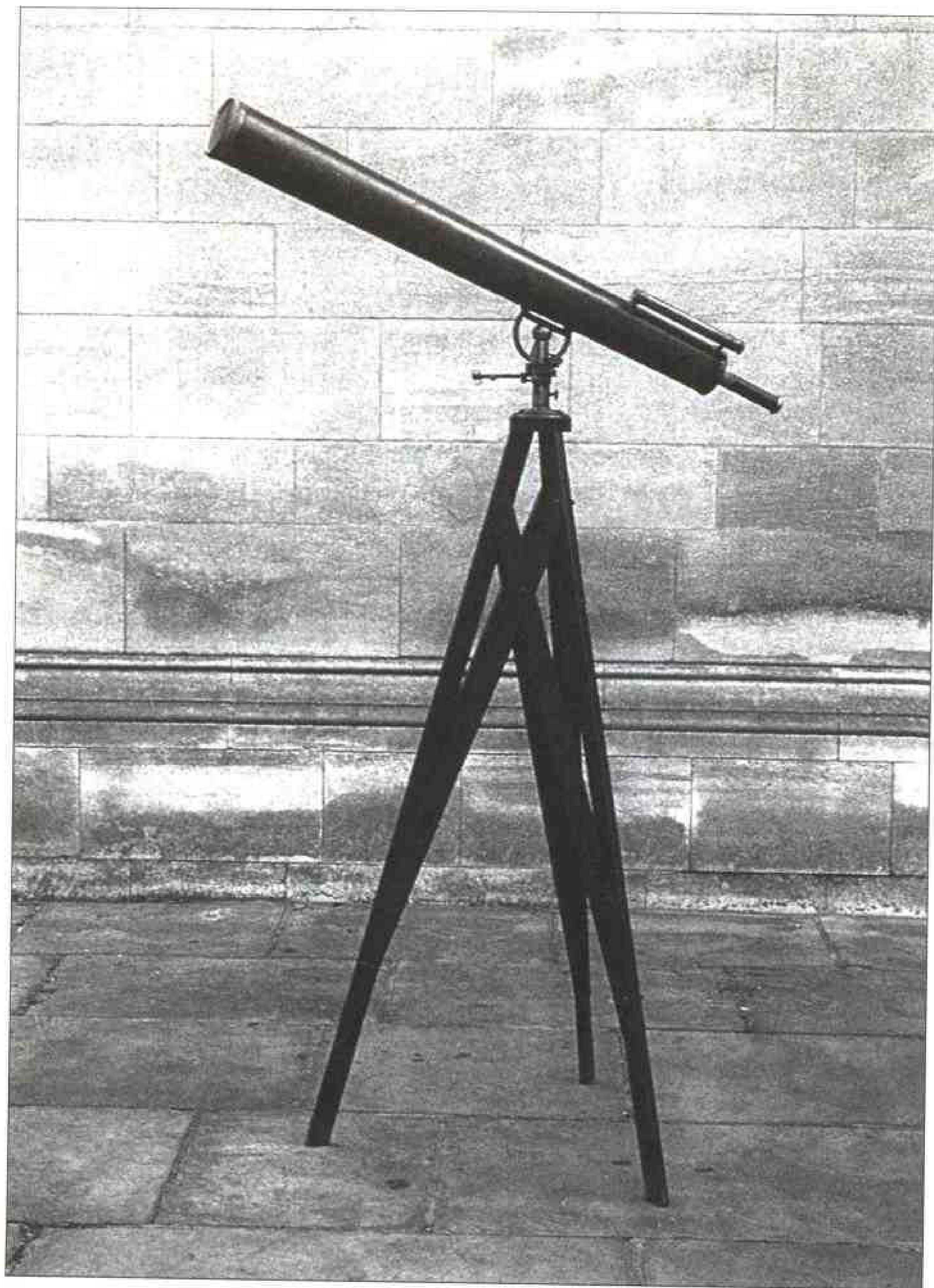
在这些星星当中，另有一颗新来者，我们前面已经提到了：1596年，弗里斯兰群岛的天文学家戴维·法布里修斯（David Fabricius，1564—1617年）宣布说在鲸鱼座出现了一颗新星。接着，另一个弗里斯兰的观测者约翰尼斯·霍尔沃达（Johannes Phocylides Holwarda）注意到一颗星从托勒密和第谷的星表中消失了。该星的位置也是在鲸鱼座，是不久前刚刚消失的。霍尔沃达的论文刚刚印好，他就十分惊讶地发现，那颗星又出现了。

最后，人们认识到，法布里修斯和霍尔沃达所说的是同一颗星。但是这颗"神奇的星"的再现却有些反常。1662年，约翰尼斯·海维留斯搜集了所有已知的观测资料，也包括他自己三年来仔细观察所积累的资料，试图找到此问题的答案。尽管这颗名为"刍藁"的变星的亮度不仅在每一个周期内会变化，甚至在一个周期与另一个周期的相应阶段也会变化，但是很不幸，3年的时间还不足以揭示其中的秘密。不过其行为的确表现出一种有意义的规律性：每11个月其亮度达到最大值。至少就此而言，该星是可以预测的。

1667年，法国神父、天文学家伊斯梅尔·布里亚奥（Ismael Boulliau，1605—1694年）在其公开出版的一本著作中宣称他知道了这是怎么一回事。他对"刍藁"变星现象提供了物理解释，这一解释一直到19世纪还在流传。布里亚奥提醒读者说，太阳是一个旋转着的恒星，而且，其表面有黑子，这些黑子会变化。他认为变星同样也旋转，其表面上也有黑子区，然而这些黑子区比太阳上的黑斑要大得多。因此恒星亮度的周期性变化源于恒星的自转，而不规则的变化则是其黑子区改变的结果。

这个解释能够非常容易地说明恒星亮度的几乎任何变化——也许太容易了。与此同时，搜寻工作仍在继续。因为如果在昨夜的通宵观察中发现了变星，那么名誉就可唾手而得，因此人们乐此不疲。在人们匆匆忙忙进行的观测中，观测者常常被观测条件的不同而造成的变化所欺骗、或者被他们的满腔热望所误导，从而认为看到了星的变化。但持怀疑态度的人却没有办法证实他们的错误。然而，这些发现——即使果有其事，似乎并没有引导天文学的发展。到了17世纪末，人们对这一命题已经不再感兴趣。

人们对之不感兴趣的原因部分在于缺乏足够巧妙的技术去监测恒星亮度的变化。根据从古代遗留下来的传统，恒星被简单地做了分类。最亮的是一等，而最暗淡的是六等。到19世纪中叶，人们将会看到，新型仪器的发明使得对恒星亮度做客观测试、以及对星等（见本书第281页）进行新的定义成为可能。而在此之前，就在18世纪的最后一年，天文学家终于找到了一种方法，利用此方法可以比较容易地确定恒星的亮度是否确实改变了。当时约翰·赫歇尔的父亲威廉·赫歇尔就在温莎城堡附近他的天文台上，制作了一套恒星相对亮度表。在这些表中，给定星座的每一颗主要恒星都与其选定的临近恒星加以比较。这些选定的恒星与表中所列恒星的亮度几乎相等。这样，表中列出的恒星的亮度在未来的任何变化都



多朗德消色差望远镜，焦距长3又1/2英尺，比约翰·古德里克1781年得到的那架要大一些。其口径为3又3/4英寸。镜筒和支架都是桃花心木制成的，"寻星镜"（安装在镜筒旁的一个低倍数望远镜，通过它使主望远镜指向所需要指的方向）是黄铜做的。"缓动"螺杆使得观测者能够使望远镜随着天球的旋转而追踪其所观测的天体。

会因为它打乱了这些公开出版了的序列而被人们发现。

赫歇尔关于相对亮度的技术是对利用亮度排定恒星序列的方法的提高。该技术于1780年被英格兰北部约克城的两位业余天文爱好者发展了。一位是爱德华·皮戈特（Edward Pigott，1753－1825年），他的父亲最近刚在该市建立了一座私人天文台；另一位是他的邻居，年轻的聋哑人约翰·古德里克（John Goodricke，1764－1786年）。1781年，皮戈特决定致力于新变星的探寻。在接踵而至的那个

约翰尼斯·海维留斯在其后妻伊丽莎白（Elisabetha）的协助下进行观测。值得注意的是，这架半径约6英尺的铜制六分仪与一个世纪前第谷·布拉赫发展了的仪器（见本书第98页）结构一致。为了测量两颗恒星张开的角度，伊丽莎白使那个固定的半径对准第一颗恒星，与此同时，她丈夫移动那个可滑动的半径，使其指向第二颗，然后在刻度尺上读取相应的角度。

夏天，这两位朋友一道重新检测了已知的变星，他们注意到了“刍藁”变星以及大陵五（英仙座β）。一个世纪前，人们曾经两次观测到这两颗星是4等星，而不是通常的2等。

1782年11月7日，大陵五和往常一样是2等星，但5天后，倍感惊讶的古德里克发现它减弱成了4等星，第二天重新又变回到2等星。其变化如此之快，文献中过去从未有过记载。

在接下去的几个星期里，两位朋友各自独立对该星进行了观测。他们的努力在12月28日再次得到回报，当天晚上，他们都看到了该星从3或4等星变成了2等星。这一过程就发生在他们的眼前。皮戈特立即想到：“大陵星亮度的改变也许是一颗大小相当于其尺度一半的行星，在绕其运行过程中，与其发生部分交食所造成的。”他甚至还计算了那颗行星可能的轨道周期。

他接着想到了更多的这些假想交食。要说明这些现象所要求的轨道周期被前所未有地缩短了，到了4月，它已经缩短到只有69个小时。皮戈特大度地让古德里克作为论文的惟一作者向皇家学会报告他们的成果，但古德里克只关注他们的观测事实，而把交食假说仅仅作为代替通常的黑斑说的一种选择。

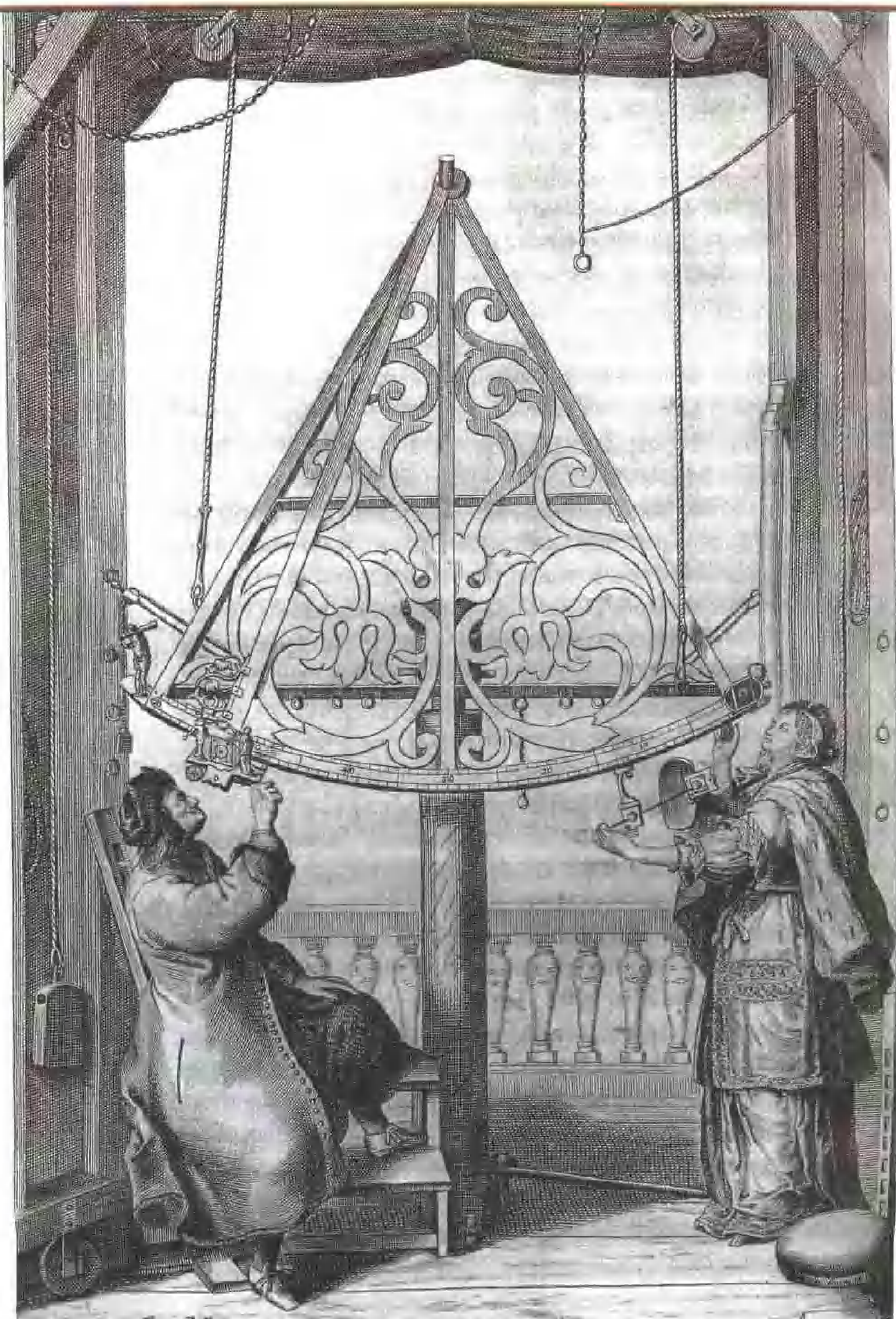
黑斑说几乎能解释任何现象，可它既不能被证实，也不能被证伪。而交食假说却能做出精确的预言：最小亮度总是一样的，完成一次变化所需时间总是一样的，光线在最小值两侧的弯曲总是对称的。有意思的是，在未来的岁月中，这两位朋友放弃了他们对大陵星的这种正确解释。也许观测条件欺骗了他们，使他们认为交食假说做出的预言未被证实；或者由于受到了他们发现了其它三种短周期变星，但应用交食假说却无法对之加以解释这件事情的影响的缘故。1786年，皮戈特离开了约克城，而古德里克则由于疾病不幸早逝。这对朋友活跃在天文学领域的岁月虽然短暂，但他们用其新的、无可怀疑的分类，丰富了人们对变星的研究。他们的周期是用天而不是用月或年来测量的。

在此之后，变星研究进入停滞状态。这种状况一直持续到天体物理学发展起来之后才告结束。天体物理学的发展提供了一种可能性，使人们能够洞察变星工作时其内在的物理过程。

太阳系的移动方向

在牛顿的宇宙中，恒星是彼此独立的，可以在任何一个方向自由移动。然而在牛顿本人的心目中，恒星却被有效地“固定”着，永不移动。最早宣布发现了恒星个体移动（恒星的“固有”运动）的是1718年的皇家学会《哲学会报》。在牛津，爱德蒙多·哈雷（约1656－1743年）一直在比较当时的恒星位置与古代所记录的同一颗恒星的位置的异同。他发现有3颗恒星，只有设想它们的位置发生了变动，才能理解托勒密的原意。毕竟，“这些星在天空中是最显眼的，很可能也是离地球最近的，如果它们自身有任何异乎寻常的移动，那是最有可能被发现的。”

随着别的天文学家也开始将当时的恒星位置与更早的观测者的记录相比较，人们期待着此后发现的运动恒星的数目会迅速增加。但情况并非如此。由固有运



动所导致的恒星位置变动是一个世纪又一个世纪积累起来的，因此要了解这些运动有赖于两个因素：过去所记载的恒星位置的准确程度，以及从当时到现在所经历的时间间隔。不幸的是，天文学上对准确度的研究是一个世纪前一点由第谷·布拉赫开创的，是望远镜发明以及用望远镜观天之前不久的事，是在人们对光线进入地球的大气层时光线方向的改动有了定量的了解之前的事情。

更糟糕的是，1728年，早期观测未曾预料到的一个大误差源被牛津的萨维廉天文学教授布拉德雷（1693－1762年）辨识出来了，这就是他对“光行差”的发现。光行差是一种效应，是由于地球绕太阳的运动所造成的速度的不断改变而导致的恒星视位置的改变，就像落在火车窗口上的雨滴由于受到火车行进的影响而发生的方向改变一样。布拉德雷后来的发现揭示了更深刻的问题：他发现了地球自转轴的摇摆即“章动”现象（这主要是由于月球对地球的非正球体部分的吸引所造成的），这种现象影响到了我们用以测量恒星位置的坐标。

布拉德雷是如何发现光行差的？这是一个吸引人的故事，我们将在后面讨论（见本书第201页）。他的成就意味着未来的天文学家将会懂得他们必须对他们的原始观测资料加以修正，以使其适应这些效应。这引导人们进入了一个观测精度大大提高了的时代。布拉德雷后来领导了这一潮流，他收集的恒星位置成了一个巨大的宝库，后来的天文学家们利用这一宝库去探讨恒星的自行。从1742年起，他在格林威治作为一个皇家天文学家，首先重新装备了该天文台。接着，从1750年直到他的健康状况恶化为止，他做了大量的观测。在此期间，他精心记录了所有的具体信息，这些信息对修正原始资料，从而得出具有极高精度的恒星位置是十分必要的。

星光的折射

天体的视位置就是从该天体发出的光线在进入观测者眼中时的方向。除非该天体正巧在观测者正上方，否则光线将倾斜地进入大气层，在其旅程的最后几英里中，光线经过的路径将因折射而弯曲。

古代的天文学家知道这一点。大约与基督同时的克利奥米德斯（Cleome－des）说看到过月亮和太阳都在地平线之上时发生的月食——尽管当太阳、地球和月亮只有在一条直线上时才发生交食。克莱奥米德斯（正确地）解释说，这是由于来自太阳和月亮的光线在经过地球大气层时都被抬高了的缘故。实际上，太阳在地平线上时被抬高的幅度大约与其本身相等，因此，如果一个观测者在没有大气层的地球上看到太阳最后一束光线将要从视野中消失的那个时刻，在真正的地球上的观测者仍然能够看到太阳的圆面。

这就是说，在地平线附近的天体的大气折射效应是相当可观的。但是，要确定一个天体的视位置与其“应在”位置之间的差别究竟多大，却并不容易。第谷·布拉赫试图编制出一个折射表，但是他认为折射效应对于太阳、月亮和别的天体的作用各不相同。他还认为从地平线起达到一定角度时折射效应为0，这个角度对于太阳而言是45°，但对于恒星只有20°。这一认识使得他的星表也受到了相应的损害。

詹姆斯·布拉德雷

詹姆斯·布拉德雷（James Bradley）1693年3月出生于英格兰格洛斯特郡的一个小城镇。他的叔叔庞德（Pound）是一位有才华的天文学家，他鼓励布拉德雷在天文方面的兴趣。布拉德雷于1711年进入剑桥的贝列尔学院学习，到了1719年，他获得神职，被指定为蒙默斯郡的教区牧师，但牧师的职责不重，因此他能够一次又一次地跑到他叔叔的天文台上帮忙。

庞德把布拉德雷引荐给了别的天文学家，其中包括爱德蒙多·哈雷。1718年，布拉德雷被选入皇家学会。1721年，他成了牛津的萨维廉天文学教授。这是一个临时教授，是他在与萨姆尔·莫利纽克斯合作进行的导致发现光行差的测量时的任职。

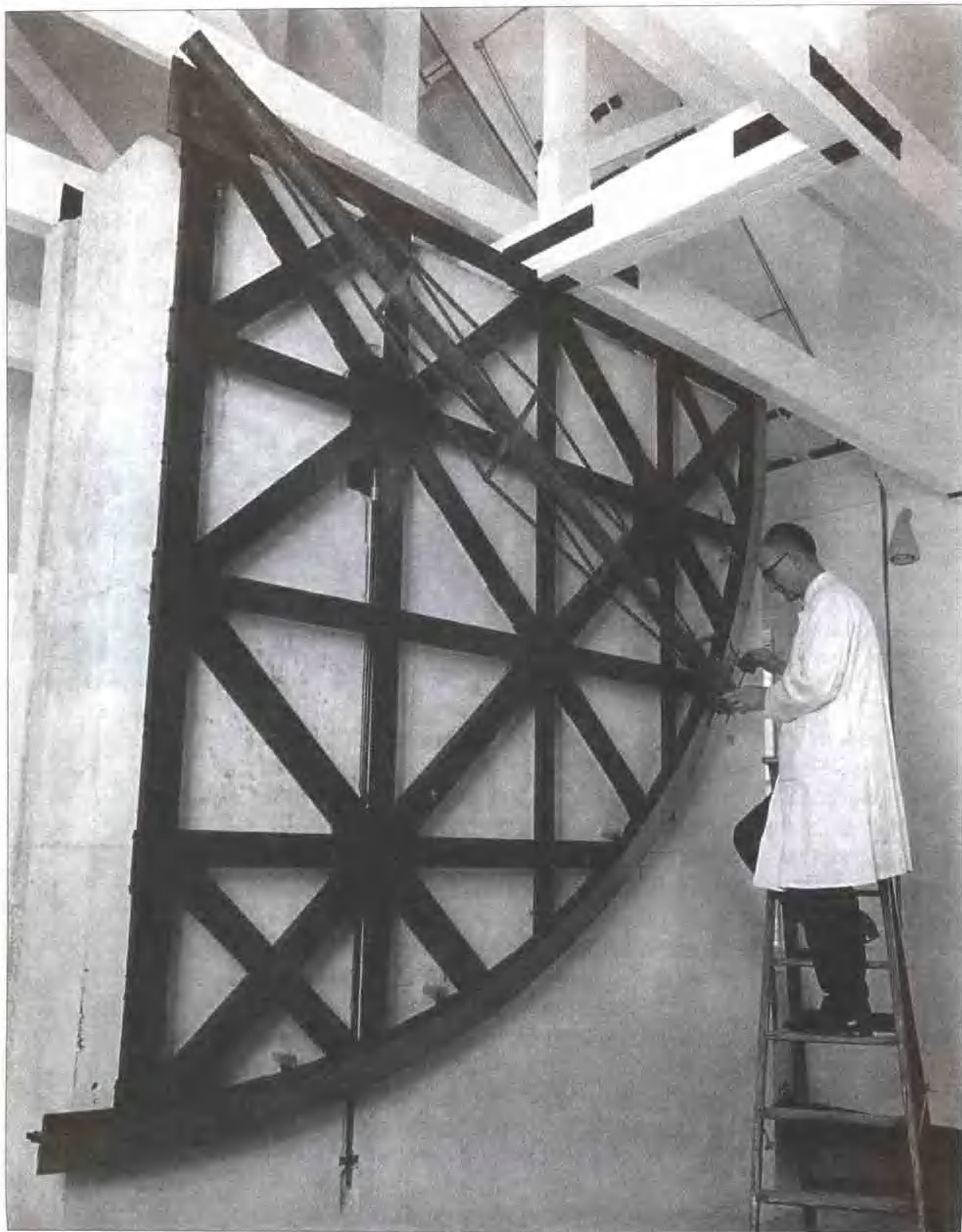
1742年，布拉德雷接替哈雷成了皇家天文学家，他发现了格林威治天文台上的许多仪器的缺陷，到了1750年，他重新装备了该天文台，从那时起直到他的健康状况恶化为止，他把自己奉献给了大量高精度的观测工作。他在长期患病之后于1762年7月13日去世。



布拉德雷自己并未活到去做这些“还原”工作的时候，但他的原始观测数据在该世纪末公开出版。德国天文数学家弗里德里希·威廉姆·贝塞尔（Friedrich Wilhelm Bessel，1784 – 1846年）后来对此做了必要的还原，1818年，他出版了一部包含有三千多颗恒星位置的1755年星表。他之所以选择1755年，是因为在布拉德雷的观测计划中，这一年是方便而又适中的一年。贝塞尔的这部著作有一个很大的题目：《基础天文学》，该书的问世使得研究恒星固有运动的学生把1755年作为测定恒星未来位置变化的计时起点。

与此同时，人们也在尝试测定恒星的自行，并弄明白它们的意义，尽管这种努力为时短暂。这不是一件可以轻而易举完成的任务。1748年，布拉德雷自己在皇家学会《哲学会报》一书中再次强调说，这种表观运动是相对的，它或许是恒星自身的运动引起的，或许是太阳系的运动引起的，也可能是二者综合作用的结果。

哥廷根的图比亚斯·迈耶尔（1723 – 1762年）于1760年解释了这两种因素是如何被分离的可能性。在恒星的视运动中，有一种可以归结为一种简单原因，即基于地球的观测者在空间中的运动。而其余的运动形式则只能用单个恒星自身的运动来解释。



但是哪种形式的运动是观测者被地球携带随太阳系的运动所引起的呢？迈耶尔指出，行走在森林里的人看见前面的树木在其走近时似乎要移动到旁边去。与此类似，如果太阳系向天球上一个特定的点（太阳向点）运动，恒星看上去就会向旁边移动。这就是说，在离开该向点的时候，每一个恒星都沿着一个"大圆"向天空上与太阳向点相对的那个点运动。

迈耶尔自己未能看到他所知的（通常是不可靠的）恒星固有运动的这种模式，他因此得出结论说太阳是静止的。他说："这些运动的真正的和名副其实的原因，也许多少个世纪里都不会为人所知"。

迈耶尔不可能预见到威廉·赫歇尔的发明。在一次最普通的探索中，赫歇尔在他的书桌旁，运用任何人都能得到的有限的数据，于1783年设法找到了太阳在沿着指向武仙星座的方向运动的迹象。

然而，在1818年，通过对《基础天文学》(Fundamenta astronomiae) 一书中的精确得多的恒星位置的计算，贝塞尔未能辨别出有可能指明太阳向点位置的任何形式的恒星固有运动。看来赫歇尔和别人所发现的那种模式的运动有可能是一种幻觉。但是随着岁月的流逝，不断增加的时间跨距使得人们能够将真实的运动从观测误差中区分了出来。1837年，波恩的天文学教授阿格兰德尔(F. W. A. Argelander, 1799 – 1875年）公布了他对不少于390颗恒星的自行的研究成果。这个数字是如此之大，以致使得他能够把它们按大小排列成3组，从

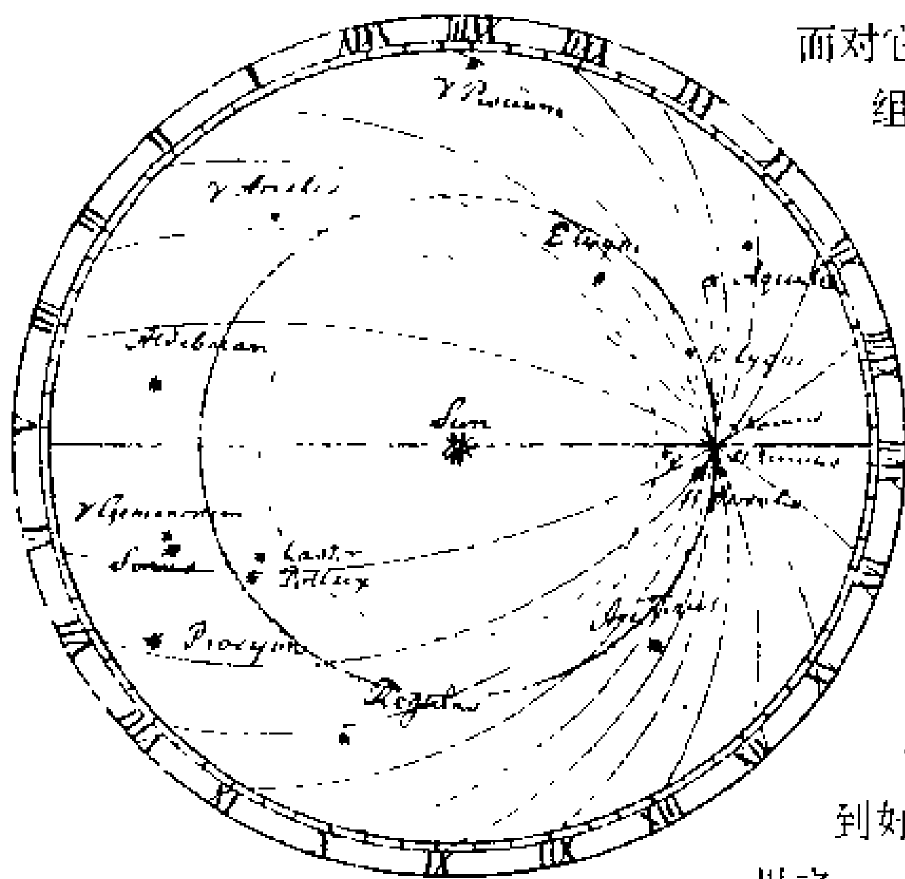
左页图：1750年安装在格林威治天文台上的墙象限仪。1724年，布拉德雷的前任哈雷预定了两架8英尺的象限仪，一架面对北方，另一架面对南方，但是他所得到的经费只能买一架。1748年，布拉德雷获得了1000英镑的购买新设备的资助，这使得他订购了第二架与之相配的象限仪。它与第一架的主要区别在于，它是用铜而不是用铁制成的，因此它在自身重量作用下弯曲的可能性要小一些。

弗里德里希·威廉姆·贝塞尔

贝塞尔于1784年7月22日出生于德国的明登，年轻时在不来梅一个商人的会计室里工作过。为了在航海理论方面得到训练，他自己"还原"了一套托马斯·哈里奥特的哈雷彗星200年观测资料，这件事给天文学家H. W. M. 奥伯斯留下了深刻印象，并导致贝塞尔于1806年成为利连瞿尔的施罗特（J. H. Schröter）的天文助手（见本书第178–180页）。

1810年，25岁的贝塞尔成为柯尼斯堡新天文台的台长，他在这个岗位上干了一辈子。他在数学方面的天才与在天文学方面一样。在1818年出版的一本书中，在还原詹姆斯·布拉德雷遗留下来的高精度观测资料时，他把两个学科综合在了一起。20年后，他用其对一颗恒星（天鹅座61）的距离的令人信服的论断结束了天文学家感到沮丧的世纪，约翰·赫歇尔称赞他的这一功绩是"应用天文学曾经见到过的最伟大和最辉煌的胜利"。他于1864年3月17日在柯尼斯堡逝世。





赫歇尔画的一幅草图，用以说明他1783年对太阳系运动方向的研究。他把北半球投影到通过天赤道的一个平面上，在上面标出了个别已知其固有运动的恒星。然后他画了一个由武仙座λ向外辐射的大圆，如果恒星位于太阳系的路径上，其固有运动将沿这些圆向离开该恒星的方向进行。

而对它们分别加以处理。这3组的每一组都产生了一个与赫歇尔所说相距不远的太阳向点。

别的天文学家很快也做了类似的分析，并得出了类似的结果。不过所有这些分析都以布拉德雷的观测为依据，都限于从欧洲所能看到的恒星。所幸的是，1750年的南天观测恒星位置被记录在一个星表中，该星表是尼古拉斯路易·德·拉卡伊(Nicholas–Louis de Lacaille)到好望角探险的（见本书239页）成果之一，而当代恒星位置则从新设在开普敦的皇家天文台和圣赫勒拿岛的东印度公司天文台的观测资料中可以找到。

1847年，一个伦敦保险师托马斯·伽罗威（Thomas GaLoway，1796－1851年）分析了南天观测恒星的自行。尽管他分析的数目很少，但他从这些完全独立的数据中得出的太阳向点位置与人们最近通过对北半球恒星的分析所得结果是一致的，这对此类现象的真实性是一个有力的支持。

从那之后，随着数据的改进，以及用于分析它们的数学方法的提高，人们对太阳向点位置的探讨也取得了不断的进步。但是，对于太阳运动的真实性及其大体上的运动方向，人们仍然不能没有怀疑。

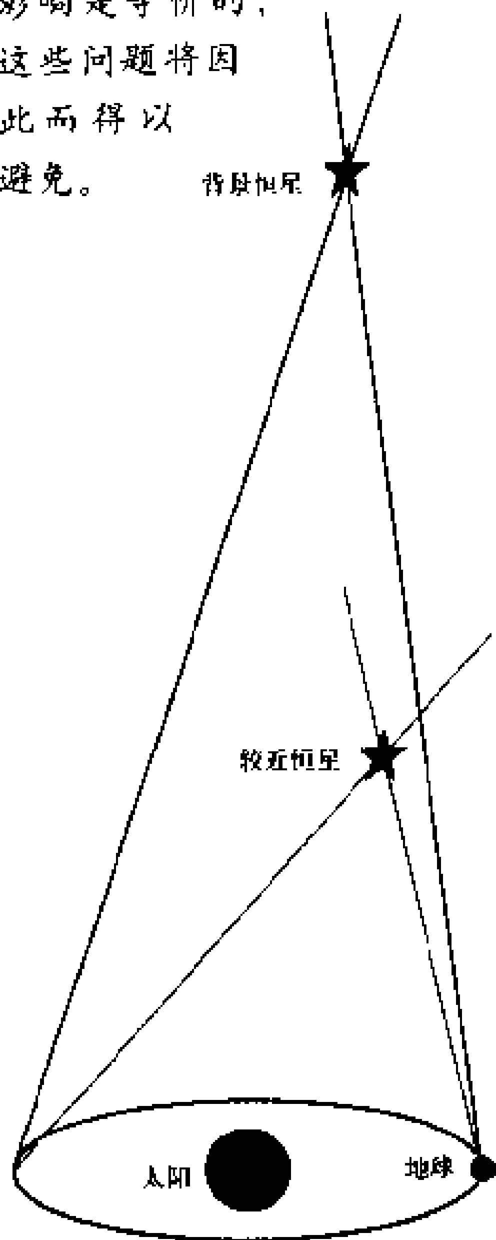
把我们与近邻恒星相分离的距离

对于我们来说，星星看上去是一个光点，我们是在天球的二维球面上测定其位置的。为了探讨恒星在三维空间的分布，以发现太阳所在的星系结构，我们必须以某种方式确定其第三维即其距我们距离的大小。

根据16世纪的哥白尼学说，地球在绕太阳的轨道上运行。倘果真如此，不妨在相距6个月的时间于地球轨道相对的两侧对一颗给定的恒星进行测量。对于这种测量，哥白尼的论敌希望知道为什么恒星位置总是一成不变的？也就是说，为什么恒星没有表现出周年视差？这种要求是非常合理的。

伽利略认识到要承认哥白尼学说，没有什么比找到一两处恒星视差的例子更令人信服的了。因此，1632年，在他的《关于两大世界体系的对话》里，他提出了一种进行这种精巧测量的方法。他认为，会有这样的情况，两颗恒星看上去在天空几乎靠在一起，而实际上这种靠近纯粹出于偶然：它们正好排列在沿地球看上去的同一方向上，而其中一颗到地球的距离是另一颗的——随便说个数字——6倍。当地球上的观测者在随地球绕太阳运动的时候，对于他来说，这两颗恒星看上去是围绕地球在各自的轨道上运行的，并且其运行轨道是完全相似的，但离他近的恒星的轨道尺度是离他远的恒星轨道尺度的6倍。

测量周年视差的伽利略方法。通过测量恒星一年之内坐标的微小变化来直接判定其周年视差是不可行的：存在着大气折射的变化、测量仪器因温度和湿度的变化所导致的形状改变等因素的影响。当采用背景恒星作为相对固定的参考点时，折射以及其它因素对这两颗恒星位置变化的影响是等价的，这些问题将因此而得以避免。



这样，如果他以较远的那颗恒星作为大自然提供的相对固定的参考点，测量较近的那颗恒星相对于它的位置，他测量到的变化将会是较近的那颗恒星的真实视差的5/6。测量值上的这种微小减弱是这种测量方法所要付出的代价，但这种代价是可以接受的，因为测量比较小的相对角度比测量比较大的绝对角度要方便得多。

恒星间距离的比例

当天文学家在思考如何追踪在12个月的时间尺度内恒星的微小角度变化这一具有挑战性的问题时，笛卡儿断言太阳只不过是离地球最近的一颗恒星，人们把他的这一断言视为至少在某种程度上提供了由一颗星到另一星之间的距离的比例尺。

让我们假定恒星（包括太阳在内）不仅仅在物理性质上是相似的，而且事实上也是相同的。让我们再进一步假定星光在到达地球的途中没有被昏暗或其它不受欢迎的复杂因素所衰减，在这种情况下，既然光线的衰减与其传播距离的平方成比例（离开蜡烛的距离增加一倍，它的亮度看上去只相当于原来的1/4），如果我们能够测量太阳和给定恒星（例如天狼星）的相对亮度，那么我们就可以得知它们的相对距离。如果太阳的亮度被证明是天狼星亮度的1百万倍，那么天狼星离开我们就要比太阳远1千倍（即离我们1000个天文单位那么远）。

荷兰物理学家克里斯蒂安·惠更斯（1629－1695年）曾尝试做过这种测量。他在自己和太阳之间放一个屏幕，在屏幕上穿一个小孔，孔的大小经过精心选择，使得太阳透过小孔看上去与天狼星亮度一样。通过对小孔中能够看到的太阳整个圆面的各个微小部分的测量，就可以得到所需要的结果。

不幸的是，太阳光太强了，事实证明不可能穿出这样一个可供测量而又足够小的孔来。惠更斯进一步通过在孔前放置一个透镜的方法来减弱太阳的光线，但对这种方法的效果他只能做出估计，无法进行定量测试。最后，他得出结论说天狼星离地球至少有27,664个天文单位。

这一结果使得恒星宇宙的尺度惊人的大。然而，惠更斯和他的同时代人所不知道的是，牛顿也在沿着类似的路径进行工作，他采用了更加可靠的技术，得到的数值也更大。

在1668年出版的一部书中，苏格兰的数学家詹姆斯·格里高利（James Gregory，1638－1675年）提出了一个绝妙的建议，以解决如何对太阳和天狼星的亮度加以比较的问题。这种方法涉及到要用一颗行星作为中间媒介：当观测者观测到一颗行星的亮度与天狼星相等时，就放弃天狼星，转而集中精力观测那颗行星。这样问题就简化为将太阳的亮度与那颗行星的亮度相比较——即将直接照射到地球上的太阳光与通过该行星反射到地球上的太阳光相比较。

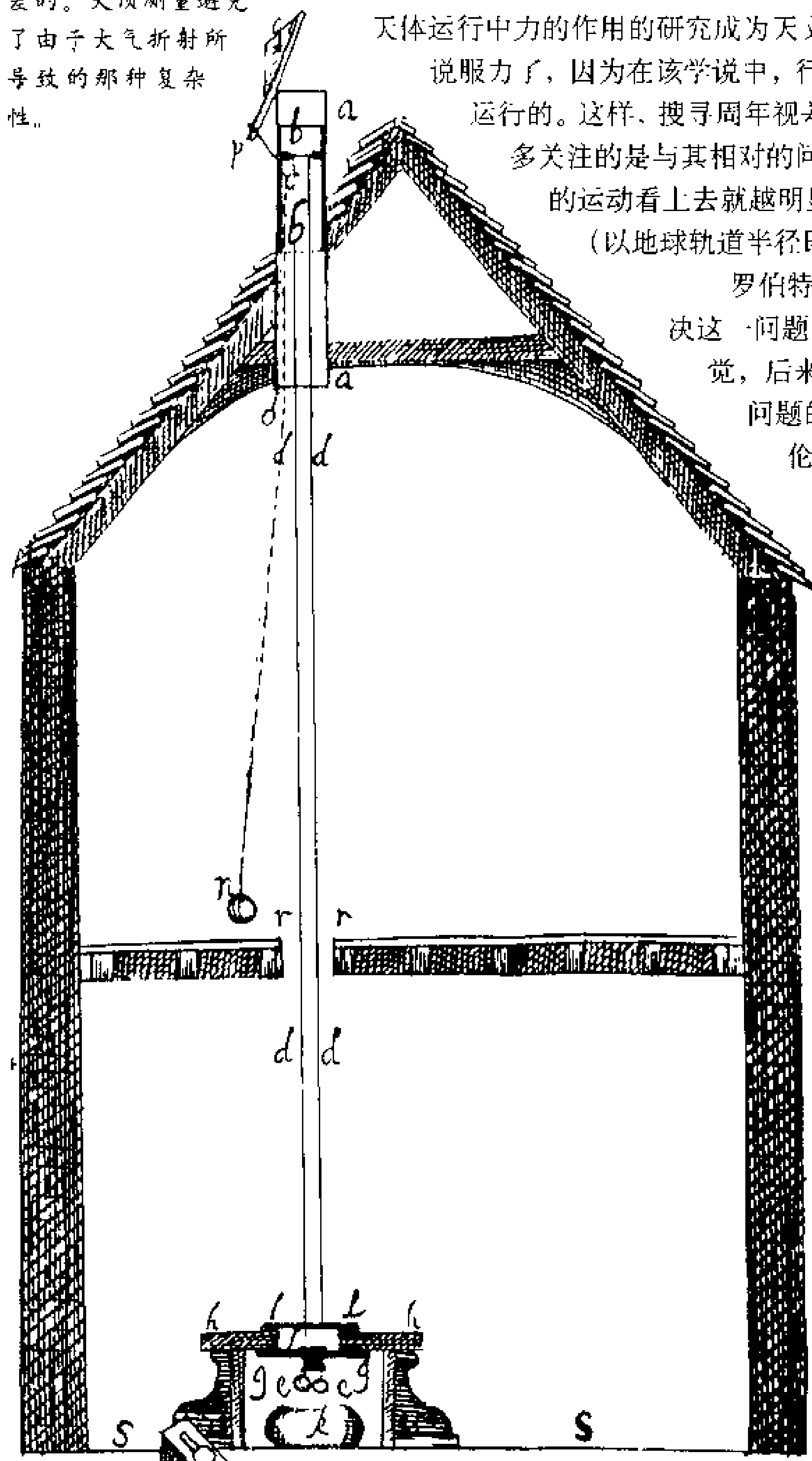
为了计算的方便，人们需要知道太阳系各成员之间的距离，需要估计出被该行星反射过来的那一小部分入射光，还要假定在行星区没有障碍物。当这一切条件都得到满足时，计算方法就显而易见了。

格里高利得到的天狼星距离为83,190天文单位。但是他强调指出，他在计算中所用的太阳系的尺度需要进一步修正，如果采用修正后的数据，所得结果将要大得多。牛顿1685年起草他的《宇宙体系》（The System of the World）时，使用了这一数据，他采用了格里高利的方法，得出的结果大得令人几乎不能相信——天狼星的距离为1百万天文单位。

牛顿曾打算把他的《宇宙体系》作为其1687年出版的《原理》的一部分，但是他后来改变了主意：非但不用更多的技术材料来充实它，而且决定在《原理》中忽略恒星距离这一主题。这种做法的结果是牛顿关于恒星彼此之间有着巨大距离的见解只为他周围小圈子里的朋友们所了解。直到1728年，他的《宇宙体系》在其身后出版，这一局面才告结束。在此期间，惠更斯的猜测（出版于1698年，在对世界的理解方面比牛顿的要差得多）在该领域占据了支配地位。

惠更斯、格里高利和牛顿所使用的方法是建立在恒星物理性质的统一性这一假设上的，人们对该假设是否可信心存疑虑，因此没有人认为他们的结论可以代替对特定恒星的周年视差的测量。但是他们的工作却在人类历史上第一次揭示了恒星宇宙那不可思议的巨大尺度。

本页图为胡克的天顶仪、下页图为布拉德雷的天顶仪。这种固定不动的望远镜是设计专门用来测量一个或多个经过观测者头顶上方的恒星位置，以此来探寻恒星周年视差的。天顶测量避免了由于大气折射所导致的那种复杂性。



这种方法还有一个更大的优点：大气折射对这两颗恒星的影响是等价的（光行差和章动——伽利略所不知道的两种因素），因此测量一颗恒星与另一颗的相对位置，这种不受欢迎的复杂因素可以得到完全避免。但奇怪的是，伽利略本人没有做出任何努力将他的这一明智建议付诸实施，而到了19世纪，以背景恒星为参照测量周年视差的方法已成为惯例。

与此同时，随着17世纪的延续，对周年视差的搜寻内容也发生了变化。当对天体运行中力的作用的研究成为天文学的一部分的时候，哥白尼学说就变得更有说服力了，因为在该学说中，行星是围绕着巨大的太阳而不是小得多的地球运行的。这样，搜寻周年视差就变成了争议相对较小的问题，人们给予更多关注的是与其相对的问题，即恒星的距离——因为恒星离得越近，它的运动看上去就越明显。对恒星周年视差的成功测量取决于其距离（以地球轨道半径即"天文单位"的倍数来表示）。

罗伯特·胡克（1635 – 1703年）最早安装了用以解决这一问题的仪器。他对大气折射效应的不确定性有所警觉，后来靠运气解决了问题。大自然为他提供了解决问题的办法：那颗明亮的天龙座γ星正好从他位于伦敦格雷汉姆学院的住所头顶上方经过。当星星从头顶上方经过时，其光线以直角进入大气中，因此不受折射的影响。

但是还存在着另一个困难：在适于观测的那几个月中，他的望远镜依然处于不能移动和无法调整的状态，胡克因此决定在他自己家的那所房子里组装一架专门用于这一目的的望远镜。

直到当时为止，望远镜天文学还处于它的幼年期，因此要建立这样的研究计划是一件非同小可的事情，它需要一架具有特别形式的望远镜，该望远镜要设计得只有当恒星在天顶附近时才能够测量出其位置来。不幸的是，人算不如天算，1669年，胡克刚刚做了4次测量，就染病在身，接着望远镜又出了一次事故，这宣告了他的这项研究的终结。从来没有人低估过他的成就，然而胡克自己却仍要宣称他为自己运用那"能够用来移动地球的阿基米德之力"（对哥白尼假说的证实）所做的工作而满足，但他的话没几个人相信。

半个世纪之后，居住在伦敦附近的成功的业余观测者萨莫尔·莫利纽克斯（Samuel Molyneux，1689 – 1728年）决

定再尝试测一次大龙座γ星的周年视差。他得到了詹姆斯·布拉德雷的帮助，还从仪器制造商乔治·格雷厄姆（George Graham）那里对一架望远镜做了测试，该望远镜是专门设计用来测量在头顶正上方的恒星位置的。到了1725年，这架“天顶探测器”被安装在莫利纽克斯家中房子的烟囱上，它可以被轻轻地沿南北方向从一侧移动到另一侧。由于天龙座γ星是从头顶上越过的，人们有意把望远镜安装得稍微倾斜一点，以使该星可从它的视场中央经过，望远镜的倾角随后可以被测量出来。

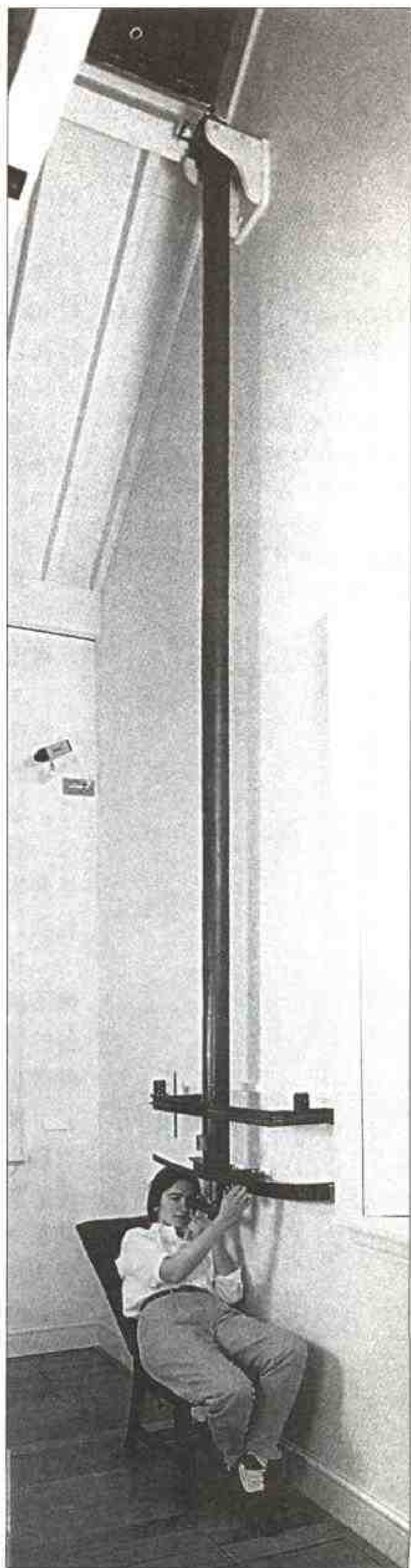
像其前的胡克一样，莫利纽克斯和布拉德雷测量的仅仅是天龙座γ星沿南北方向的一维坐标。简单的计算表明，周年视差会导致这颗恒星在12月18日达到其最南的位置，在此前后的几天里，其移动小得令人难以察觉。因此，当布拉德雷于12月21日发现它走到比几天前更靠南的位置时，人们对此感到极为惊讶。尽管此后视差的作用应该是使其向北移动，但其向南的移动在随后的几周里持续存在，直到第2年3月，它走到了比其12月时的位置更南边约20弧秒时这一现象才告结束。此时这颗恒星停止了它的移动，然后开始向北移动，到6月回到它在头年12月时的位置，9月达到其最北端。

莫利纽克斯和布拉德雷这两位朋友对上述现象做了各种可能的解释。他们特别考虑了这样一种可能性：是否地球的大气层没有形成真正的球形环层，以至于当恒星即使在天顶时也会受到折射的影响？

布拉德雷认为，他们应该对更多的恒星进行考察。为此，他委托格雷厄姆制作了另一架天顶仪。这架望远镜与已有的那架结构相似，但镜筒要短些，因此视场更大。在这些努力之下，恒星的这种运动模式很快就被搞清楚了，但布拉德雷却迟迟找不到对其合理的物理解释，据一个可信的传说，说是直到有一天，当他在泰晤士河上泛舟游玩时，触景生情，突然找到了解决问题的答案。他注意到当船转向时，船上的风向标也随之转向，这当然不是由于风向发生了变化，而是由于风向标的指向不仅取决于风的速度，而且也取决于船的速度。

让我们再回到17世纪70年代，当时丹麦天文学家欧利·罗默（Ole Römer，1644–1710年）曾经证明，光速虽然很大，但仍然是有限的：当木星接近地球时，人们观测到的木卫交食发生时间比通常情况下要早；而当木星远离地球时，观测到的木卫交食时间则比通常情况下要晚。现在，通过对风向标的类推，布拉德雷意识到，既然光速是有限的，那么他所见到的恒星位置不仅取决于该恒星所发出的光的速度，而且也取决于地球的运动速度。他一直在寻找恒星周年视差，这是基于地球的观察者在地球轨道半径的外端点处进行观察时所产生的一种效应，而他找到的却是“光行差”，是由地球本身的速度所造成的。沿地球轨道的切线方向，半径与切线相互垂直，因此光行差与周年视差之间有3个月的相位差。

布拉德雷的发现寓意深远。首先，他辨识出了以往恒星坐标测量中人们未曾预料到的一个错误，其中就包括1725年最新出版的约翰·弗拉



203页：杰西·拉姆斯登发明的巴勒莫（意大利港市）圈，皮亚齐用它观测到了谷神星小行星（见第180页）、编制了有近八千颗星的星表，发现了天鹅座61。在1780年安装它的过程中，拉姆斯登曾两度放弃了它，但事实上他还是于1789年完成了这项工作。借助于显微测微计，可以从水平尺的刻度上读出要测量的方位角来，而高度则需要借助于两架完全相对的显微镜从竖直尺上读出。在第179页可以看到拉姆斯登以及他用来刻画刻度的刻度机（背景就是这个环圈）。

姆斯提德那部杰出的"不列颠星表"在内。由于光行差的作用，恒星的视位置在6个月的周期里的变化可高达40弧秒。布拉德雷的发现及其后来的论证（见本书195页）揭开了精确定位天文学时代的序幕。

其次，尽管该发现是以全然未曾预料到的形式出现的，但它为地球环绕太阳的运动提供了确切的证据。

第三，既然所有被讨论的恒星都受到了相似的影响，它们的光线一定以相同的速度到达地球，不管它们传播的距离有什么不同。另外，如同对木星卫星交食时间的分析所示，不管光线是直接发射出来的还是被反射过来的，它们的速度都相同。光速是大自然的一个常数，布拉德雷计算出光从太阳到地球需要8分12秒，与现代值的误差在8秒之内。

第四，布拉德雷在探寻周年视差上的失败表明，这种视差太小了，所以即使用他的那种高精度的仪器也探测不到。它一定小于1弧秒。简单的计算表明，他们所研究过的那些恒星距地球的距离至少为日地距离的400,000倍。

布拉德雷于1729年元月在皇家学会宣读了他的研究成果，比牛顿的《宇宙体系》晚面世几个月。牛顿在其《宇宙体系》中计算出，如果——是个大写的"如果"——天狼星与太阳物理性质相似，那么通过将其亮度与太阳的亮度相比较，可以得出其距离比太阳要远100万倍的结论（见第199页）。

关于恒星距离问题的这两项主要贡献现在相继问世：牛顿基于恒星具有相同的物理性质这一假设，所提出的最近的（最亮的）恒星位于距地球100万天文单位处的学说；布拉德雷的观测证据所表明的某些恒星距我们至少400,000天文单位。这两项研究成果的集中出现，最终确定了星际距离的测量应该以百万天文单位为量级来进行。它也表明，周年视差的测量是对极端精密技术的挑战：这种测量要求测出在几个月的时间内，在几英里之外，移动范围不大于一个硬币的那种运动。

正因为这样，天文学界在决定重新对视差进行测量之前，曾有过长时间的犹豫不决。这一点并不令人惊奇。但是随着新一代仪器制造家的不断出现，天文仪器的精度也得到了不断的改进，到了19世纪早期，天文学家们再一次开始了对这种微小运动的探测。

要进行探测，选择离地球最近的恒星作为研究对象是至关重要的，因为它所表现出来的视差最大。要进行这种选择，最明显的判据就是亮度：在其它条件相等的情况下，最亮的也就是离得最近的。但是，不断积累的观测证据却表明恒星的发光度（恒星的"绝对星等"）变化幅度很大，因此天文学家们越来越倾向于改变主意，赞成大的固有运动对解决该问题是比近距离更为可靠的指南这一观点。

令人感到惊讶的是，在所有当时已知的固有运动中，运动幅度最大的那颗却相对较暗（5等星）。该星是天鹅座61，它在天空的移动幅度达到每年5弧秒。它的运动早在1804年就被皮亚齐注意到了，但是他在巴勒莫与世隔绝，因此直到1812年，弗里德里希·威廉姆·贝塞尔独立公布了对其大幅度运动的说明，这颗"飞星"才获得了人们应有的注意。即使如此，人们试图测定其视差的努力好几次都无疾而终，就像对大量别的恒星所做的测试一样。

显然，是重新把握和思考所采取的战略的时候了。天文学家们能够用来辨识



离我们最近的恒星的标准是什么？出生于德国的威廉姆·斯特鲁维（Wilhelm Struve，1793—1864年）在其1837年发表的一篇论文中提出，这种判据一共有三条：它是否是最亮的恒星之一？它是否有较大的固有运动？如果它正巧是个“双星”（不是一颗星，而是被引力约束在一起的两颗星），那么考虑到其绕轨道运行的时间，它的这两部分是否看上去彼此分得很开？斯特鲁维在发表这篇论文时，是多帕特（Dorpat，今爱沙尼亚的塔图）的一位教授。他开列了符合上述判据的恒星，并对其中符合不止一条的给予了特别关注。如果拿斯特鲁维的论文来核对现代的离我们最近的恒星表，就可以看出，天文学家们正在为他们的视差测量选择最合适的对象。

具有同等重要性的是所使用仪器的质量。在多帕特，斯特鲁维有一架孔径为24厘米（9.5英寸）的大型折射望远镜，是德国工艺师同时也是理论家的约瑟夫·夫琅和费（1787－1826年）制造的。这架望远镜是世界上同类中最大的。在德国的康尼格斯堡（柯尼斯堡），贝塞尔有一架16厘米孔径（6.5英寸）的夫琅和费式“太阳仪”，对于测量小角度而言（见第207页），这是一架理想的仪器。这两位学者都决定在测量他们所选定的恒星的位置时，以其近邻的恒星为参照，因为他们都采纳了伽利略的方法，并有足够的理由相信那些近邻恒星比选定的恒星离得更远。

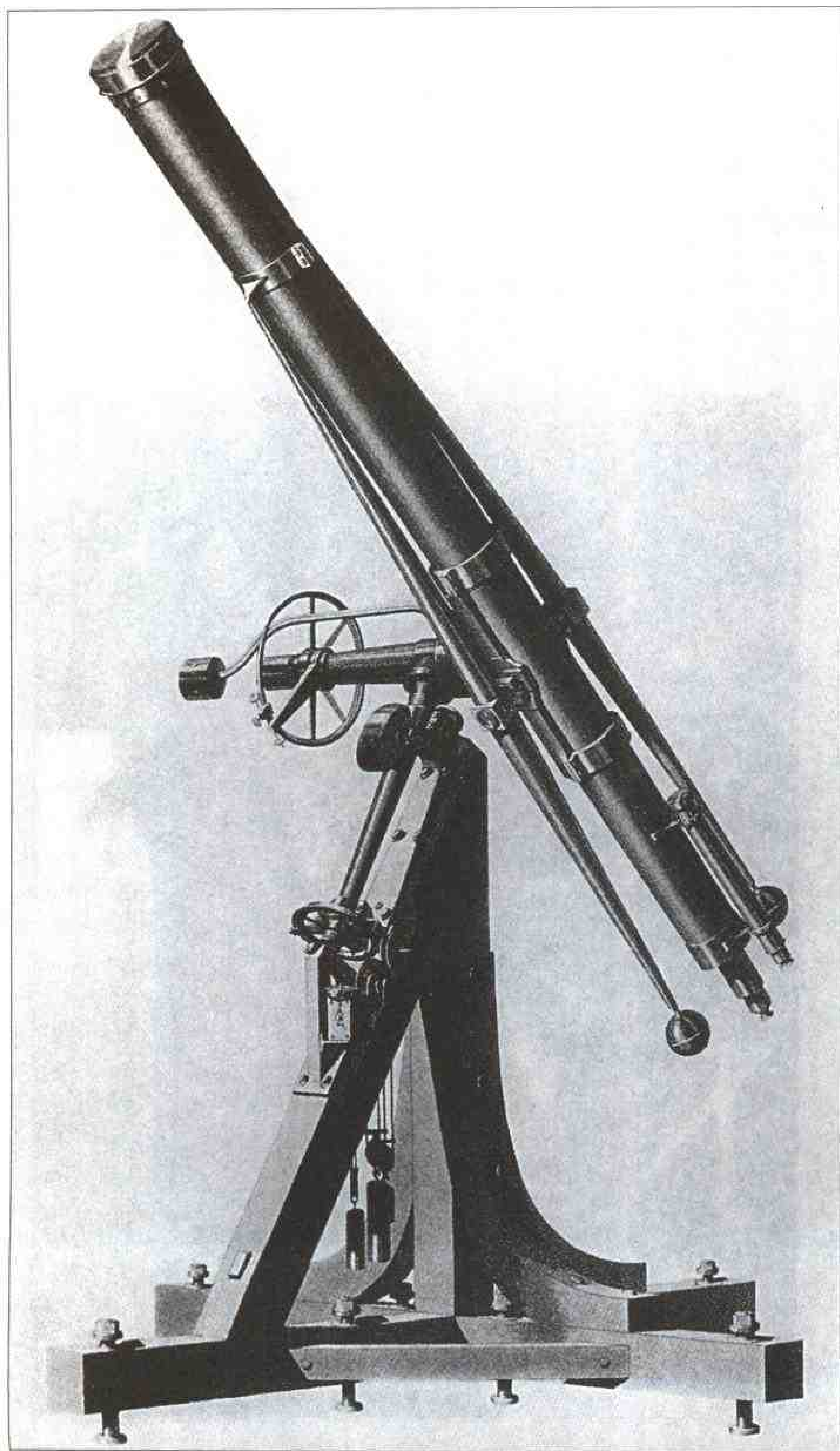


威廉姆·斯特鲁维

F. G. W. 斯特鲁维1793年出生于德国的阿尔托那（Altona）。他的父母把他送到国外以躲避服兵役，因此他是在俄罗斯多帕特的大学学的哲学，然后获准在该大学天文台工作。1813年，他被任命为观测员和天文及数学教师。他是一位勤奋得令人惊异的观测者，特别是在对双星和多星的研究方面。他也为改善多帕特的仪器做出了巨大的贡献，其中包括1824年从夫琅和费那里获得了一架24厘米（9.5英寸）的折射式望远镜，这架望远镜是当时世界上最大的。

他的成就使他得到了圣彼得堡科学院的邀请，圣彼得堡科学院让他在普尔科沃（Pulkovo）建立一个天文台，并担任台长。斯特鲁维得到了足够的经费，可以购买他能得到的最好的仪器，普尔科沃天文台于1839年开张，并且很快就被人们公认为是世界上处于领先地位的天文台。

斯特鲁维1862年退休，他的儿子奥托继承了他的职位。他的后裔中有4人成为杰出的天文学家。斯特鲁维1864年11月25日于普尔科沃去世。

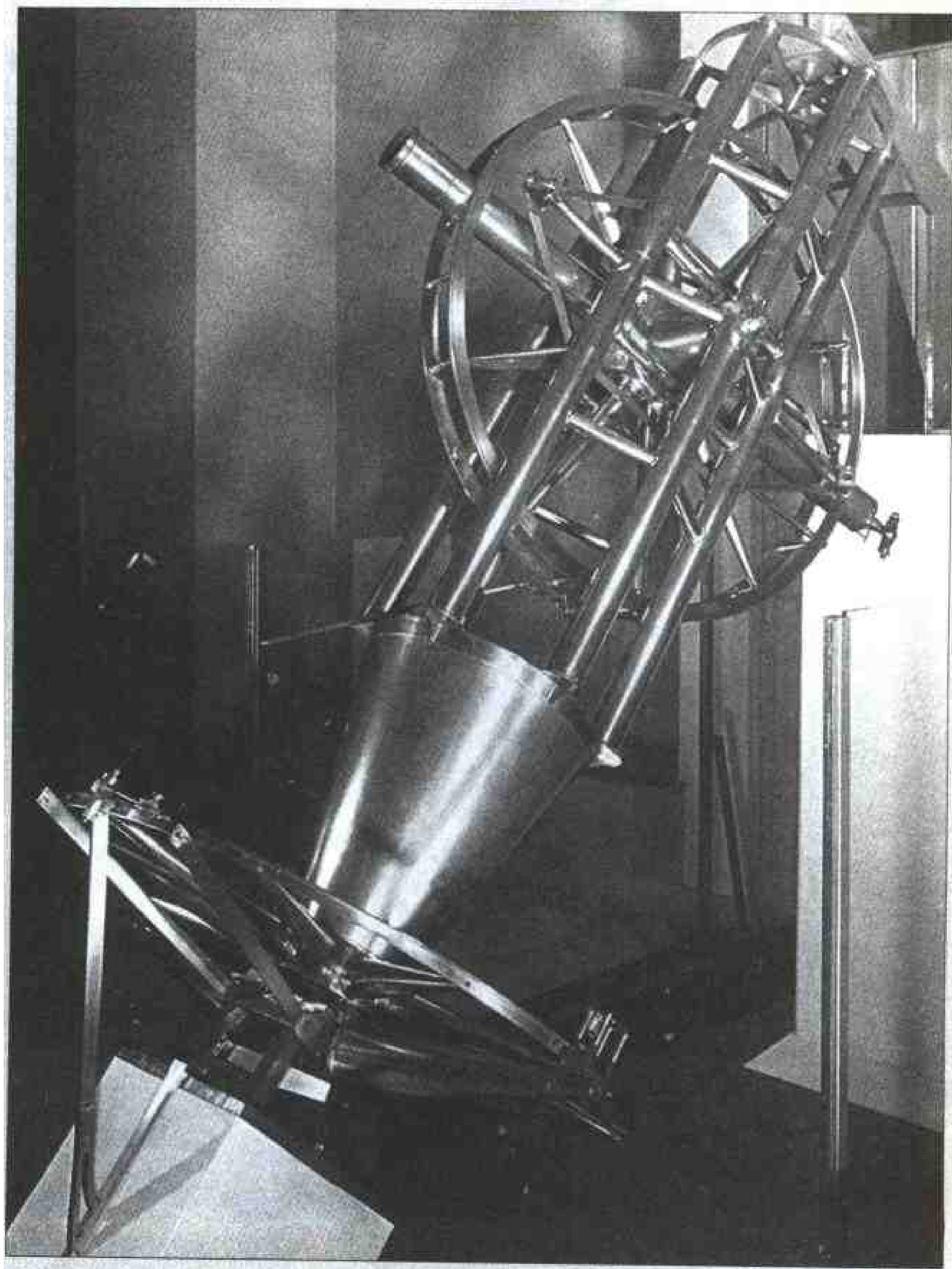


1824年在多帕特安装的大型折射望远镜。它的赤道式安装、独一无二的尺寸、高质量的消色差物镜等使得它成为研究双星的理想仪器。斯特鲁维以每分钟7颗星的速率，花了两年的时间，观测了多达120,000颗恒星，以发现其中的双星。接着他又用了10年的时间，对他发现的双星进行测量。1837年，他发表了三千多颗双星的有关数据，其中的3/4是以前人们所不知道的。这架仪器使他在竞争中处于领先优势，这使得他的朋友、竞争对手詹姆斯·索斯匆忙采取措施以图迎头赶上，结果导致了一场灾难（见本书第237页）。

追踪天球：赤道式安装

不管是反射望远镜还是折射望远镜，其最简单的安装方式是地平式的，用这种方式安装的仪器可以水平旋转（测方位角），也可以沿铅直方向旋转（测高度）。然而，天球是绕着天极旋转的，这意味着使用地平式望远镜追踪天体的观察者必须在水平和铅直两个方向不断地对其加以调整。作为对比，按"赤道式"安装的望远镜其轴线指向天极，用它追踪天体时只需要沿一个方向对其加以调整就行了。

从第谷·布拉赫时代起，人们对赤道式安装的优越性就有了清楚的认识，但是直到18世纪，建造技术得到了改进，这种安装方式才在业余天文观测者喜爱的携带式望远镜中流行起来。然而，到了19世纪早期，人们已经能够为最大的折射式望远镜提供赤道式安装了，多帕特的那架赤道式望远镜（见第205页）就是例证。到了现代，计算机控制导向系统解决了对天体的平滑追踪问题，赤道式安装就成了折射式和反射式望远镜的标准安装方式了。



这是杰西·拉姆斯登(Jesse Ramsden) 1791年为乔治·萨克堡爵士(Sir George Shuckburgh)在英国沃里克郡的私人天文台建造的"萨克堡赤道式"望远镜。望远镜的轴指向北天极，这样观测者要追踪恒星时，只要在一个方向对其加以调整就行了。这是第一架"赤道式"望远镜。

分透镜测微计

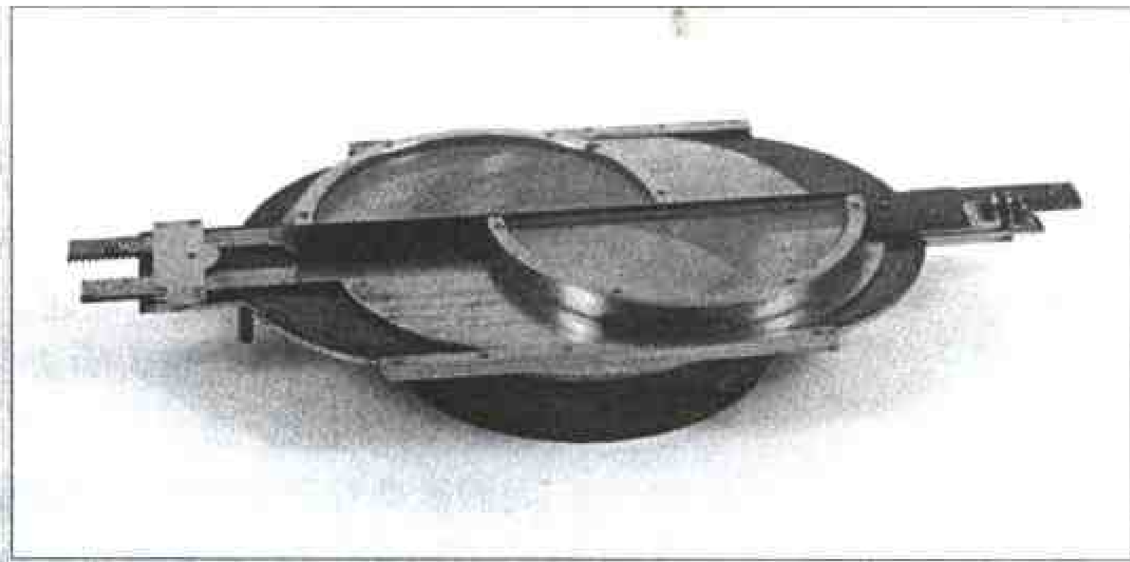
如果把物镜沿直径切成两个半圆，那么每个半圆都会对所观测到的天体形成一个完整的像，而像的亮度则只有原来的一半。如果这两个半圆相互错一下位，那么这两个图像也要相应地发生错位。

这可以用来测量小的角度，例如组成双星的两颗星之间的角度。一开始，观测者只是以通常的方式看到了这两颗星，但当这两块半镜错位时，每颗星都出现了两个像，把第一颗星的一个像调整得与第二颗星的另一个像相重合，所需要的调整量就是将这两颗星分开的那个角度的大小。

1753年，伦敦的仪器制造商约翰·多朗德（1706－1761年）以此为基础制作了分透镜测微计，这种测微计很快就成了他所出售的很多反射式望远镜的附件。这种仪器因为在一年的不同时间里都适合于测量太阳的视直径，因此也常常被叫做"太阳仪"。

在19世纪早期，尤其是经过约瑟夫·夫琅和费（Joseph Frauhofer）和他在慕尼黑的继承人的努力，这项技术被用到了折射望远镜的物镜上。要做到这一步很不容易，因为要把一个大型的高质量的消色差透镜切割成两半，需要掌握金刚石刀具的冷加工技术。贝塞尔于1837－1838年间用这种仪器最早对恒星间的距离做了令人信服的测量，这是人们使用夫琅和费太阳仪的一个范例。

下图为18世纪晚期的一台分透镜测微计。测量时两个半圆透镜之间的最大位移距离是5.5英寸，读数精度可达0.002英寸。



1835年，斯特鲁维选择织女星作为其研究对象。这颗星格外明亮，固有运动也很大，因此符合他的关于近距离恒星三条判据中的两条。1837年，他宣布说从17次观测结果中可以推断出该星有1/8弧秒的视差。这与现代值颇为接近。但是他承诺继续观测，到1840年，他给出了近一百次观测的结果，结果将视差的值增大到了原来的两倍。对视差测量的各种不确定说法由来已久，面对这种情况，天文学家们心存疑虑。

但与此同时，贝塞尔把他的太阳仪对准了天鹅座61。他于1834年开始对该星进行观测，但不久就因为哈雷彗星的到来而转移了兴趣，直到1837年，他才又重新恢复对天鹅座61的观测。受到斯特鲁维的初步结果的鼓励，他用一年多的时间对天鹅座61进行了高强度的观测，一般情况下每晚重复观测的次数高达16次，在"可见度"特别好的情况下观测的次数还要更多。他在数学方面的技能使得他能够处理诸如折射之类的问题。到了1838年年底，他宣布说该星的视差大约为1/3弧秒。他的结果之所以令人信服，是因为他的多次观测式样与理论预期相符。约翰·赫歇尔以皇家天文学会的身份，对学会会员们表示祝贺，认为他们终于活着看到了探测宇宙恒星奥秘的绳索探到了它的底部。

就在此后几个星期，曾经在好望角天文台工作过的皇家天文学家托马斯·亨

德森（Thomas Henderson，1798－1844年）宣布在南天球有一颗星的视差超过了1弧秒，这就是半人马座α。这颗亮度很高的星有很大的固有运动，是颗双星，其伴星有着很大的分离角。因此，它满足了斯特鲁维关于近距离恒星的全部3条判据。在迄今所知道的星中，这颗星及其昏暗的伴星半人马座第二是离太阳系最近的星。

恒星宇宙的结构和历史

就在人们试图测出离我们最近的恒星的距离，并了解恒星世界中正在发生的变化时，一些探索者却试图从整体上理解宇宙。其中一人激怒了伊萨克·牛顿，使牛顿尝试着对恒星宇宙的结构做了分析，牛顿的分析对我们今天对宇宙的理解仍然有着影响。

牛顿的宇宙和夜晚的黑暗

如果一个人在阅读牛顿的《原理》（1687年）时，希望从中找到作者对于恒星宇宙的构想，那他一定会失望。牛顿对恒星几乎毫无涉及，既没有对单颗星做过剖析，也没有对其整体展开论述。他对它们不感兴趣：尽管有近二千年的观测，也没有发现一丁点与古希腊人的信念相矛盾的证据，希腊人相信恒星是“固定”的、彼此之间没有相对运动。

人们很难看到他们所没有期望看到的东西：牛顿自己沿用了拉丁语中fixa（即恒星）这个词，这样的术语对于在他的大脑中杜绝恒星有可能会移动的这一念头一定会起作用。尽管牛顿在历史上第一个认识到了即使最近的恒星离开我们的距离也庞大无比，但他从未想到用该认识来否定恒星是固定不动的这一假说——它们的固定不动并非因为是真正静止的，而是因为它们离开我们的距离是如此之大，以至于我们探测不到它们的运动。

牛顿同样没有意识到，恒星的这种固定不动对他的引力定律构成了一种威胁：他宣称引力是万有的，而力会导致运动——然而任何一颗恒星却都是静止的。1692年，牛顿开始勇敢地面对这一问题，是年轻的神学家理查德·本特利（Richard Bentley，1662－1742年）促使他不得不这样做的。本特利曾经受任做一个关于科学和宗教的兼容性的系列布道——实际上是讲演。他知道剑桥的卢卡斯讲席教授写了一部书，以揭示宇宙学中的主要奥秘，但这部书充斥着大量数学，使人难以读懂，因此他鼓足勇气，直接给作者写了一封信。

本特利反对牛顿这位笛卡儿论者的主张，该主张认为上帝创造了宇宙，并使其开始运动之后，就放手让它自行运动，对其是否保持良好的运动状态不再有任何兴趣。但他想知道如果要支持这样一种观点的话，还能够再说些什么。因此他写信问牛顿，如果物质均匀地分布在无限空间中，并且在引力的作用下可以自由运动，会出现什么情况？牛顿认为本特利有意用“均匀”这个词来表示物质通常或多或少的分布，于是回答他说不管在什么地方，只要那里的物质比通常情况下多一点，引力就会比别的地方大一些，就会把周围的物质吸引过来，这就增加了

物质的聚集程度。这就可能导致星星的形成。

然而，本特利却打算用绝对的、数学上的意义来使用“均匀”这个词，牛顿在压力下只好让步，承认对称将使得物质继续处于静止状态，因为物质没有理由向这个方向而不是向另一个方向运动。但是他警告说，这样的宇宙是极其不正常的——就像有无穷多的缝衣针都能针尖朝下平衡站立在无限大的镜面上一样不可思议。面对牛顿的答复，本特利一想到无穷多的恒星显然都是静止的，于是他就有充足的理由反驳说：“如果它不是坚硬的话，那么在无限空间中的无穷多的这样的物块怎么能够维持平衡呢？……”

本特利与牛顿的信件往复到此就结束了，但牛顿的大脑面对这一挑战并没有停止思考：如果引力是万有的，恒星怎么可能是静止的呢？历史学家们感到幸运的是，牛顿似乎把他的论文的所有碎片都收藏起来了。他当时正在为他的《原理》的第二版准备材料，通过他遗存下来的一连串的草稿，我们可以看到牛顿当时是如何设法应对这一挑战的。

他的解答是上帝在一开始设计了一个无限静止的恒星系统，这个系统几乎是完全对称的，因此也是稳定的（除非经历了很长时间）。随着时间的流逝，这种对称的不完整性所导致的运动变得足够的大，通过我们现在所说的“引力坍塌”使得最初的秩序面临被破坏的危险。在此情况下，上帝就要进行干预，将恒星重新推回其最初位置。牛顿用这种方式维护了他关于上帝是一位巨大的钟表制造家的信念，他认为上帝的宇宙是一架机器，一代一代永远持续下去。的确，牛顿对上帝心存感激之意，因为上帝使他和别的“自然之书”的学生能够欣赏上帝是如何富有远见地一次又一次的对自然进行干预，以维护恒星系统这架机器，如同他维护行星机器一样（见151页）。上帝远非像笛卡儿学派所假设的那样，对其制造出来的创造物置之不理。在牛顿看来，上帝与其创造物之间缔结了一种维修合同。

牛顿同时代的大学者莱布尼茨（Gottfried Wilhelm Leibniz，1646—1716年）赞同上帝是钟表制造家的信念，但是他在一封著名的信件中争辩说，一个完美的钟表制造家制造出的是完美的钟表，是不需要维修和保养的钟表。对于莱布尼茨来说，牛顿让上帝对宇宙去进行绝望的修补，实在是一件匪夷所思的事情。因此他反对牛顿的上帝观念，认为那是完全不合适的。但是对于牛顿主义者而言，上帝的干涉并非对紧急情况的补救，也不是出于对宇宙崩溃的担心所激发出来的奇迹，而是神从一开始就安排好了的计划的一部分。

如同大多数的论战一样，莱布尼茨和克拉克的争论一直进行到争论的双方中有一方去世为止。实际上，这种不变的宇宙钟将会被人们放弃，而被代之以演化模式。这种模式是由引力和别的力所促成的，人们将其视为自然的，也是人们所期待的。但那是将来的事，当时，牛顿的均衡宇宙正受到来自一个最意想不到的区域的挑战。

1690年，牛顿在勾画他的理论时，曾为自其宇宙的几何对称模型所预期的近邻恒星的数字与星表上实际开列的亮星的数目的基本相符而沾沾自喜：在太阳的近邻中，模型与实际观测之间符合得相当好。然而，他在很大程度上忽略了与恒星宇宙有关的一个基本事实，即银河系中恒星的聚集问题。（在当时的天文学家和

伊萨克·牛顿的工作

牛顿的工作习惯是反复对草稿进行修改，然后把每一张稿纸都收藏起来，这使得我们可以越过他的肩头，看到他的工作。这两张纸片就是他的草稿的一部分，他在这些草稿中要证明从星表中所得的证据与他的宇宙模型是和谐一致的。在他的模型中，恒星系统是自由的，也基本上是对称的，因此每一个恒星所受到的来自别的恒星的引力沿各个方向几乎是相等的，因此它能够继续保持静止（即"固定"）。

他所用的星表列出了各个恒星的观测位置（即从地球看上去的方向）及其视亮度。然而，他的模型涉及的却不是亮度而是（相对）距离，所以，如果不在亮度和距离之关系上做些假定，他的模型就没法用观测进行检验。因此，牛顿假定所有恒星在物理性质上都是相同的，这样，亮度和距离就直接相关了。他明确提出，亮度为一等、二等、三等……的星分别位于距太阳系一个、二个、三个……单位的距离处。

由于观测者的观测范围从太阳系扩大到了其周围的空间，为了使上述的检验切实可行，牛顿不得不对他的均衡宇宙模型（在这种模型中，太阳没有什么特别的意义）做些修改。在修改后的模型中，太阳周围环绕着半径分别为一、二、三……个单位的球层，在这些球层上分别分布着亮度为一、二、三……等的星，在同一球层上的星彼此之间的距离至少相距一个单位。

最近的（最亮的）恒星位于离地球一个单位之处，但它们彼此之间也至少相距一个单位。牛顿知道在半径为一个单位的球层上，以这种方式可以有12个（或13个）分布点，因此他期待着共有12个或13个一等星。下一个球层半径为2个单位，面积是前一个的4倍，因此分布点也应该是12或13的4倍（也就是五十个），这样牛顿就预期有五十颗左右的二等星。依此类推，在半径为3、4、5、6个单位处，分别有110、200、310、450个分布点，牛顿认为相应地也应该有那么多的三等、四等、五等、六等星。

在牛顿遗留下来的这两片草稿中，我们通过第一片可以看到，牛顿做了两次尝试，去勾画这一模型。在第二次尝试中，他给出了由该模型所得出的上述数字，并且简单地宣布说，恒星的数字与模型的预期是基本一致的。而在第一次尝试中，他给出了一等星的个数（13个，这个数字与他的模型的确相符），而在标注其它诸等星的个数处留下了空白，没有标明具体数字，与此同时，在没有进一步考察的情况下，他却宣布说这些数字与预期是符合的。

换句话说，牛顿对他的模型是如此之自信，以至于在他看来没必要对其进行检验。

在第二片草稿中，牛顿试着对同一论题再次做了勾画。这一次，他确实检验了证据。他说，一等星有15或16颗，二等星有63颗，三等220颗，四等500颗——在这一点上，他逐渐意识到，对于他的模型而言，这些数字实在太大了。

他对此的最初反应是停下脚步，删去任何提及五等和六等星之处。他的理由是该星表在开列那些微弱的星时不够完善。然而，人们仍然会说，问题在于它们太完美了。于是，牛顿想到，他的第n等星位于第n个单位距离处的假想是过于草率了（确实，现代解说认为六等星位于10个单位距离处）。他因此采用了一个更灵活的方法。在做了一个有些许创造性的修正之后，他劝慰自己说他已经挽救了他的理论。





牛顿证实自己的宇宙模型的第一次尝试。他指出一共有13颗一等星，这个数字与其模型几乎完全一致。他在应该标注其它数字的地方留下位置（这显得很突出），没有具体标明。他假定这些数据与他的宇宙模型是一致的。

在第二片草稿中，牛顿填上了数字（用黄颜色突出标明），他的模型预期的恒星数为：一等星12或13颗、二等50颗、三等110颗、四等200颗、五等310颗、六等450颗。他声称事实上这些就是前六等星的数目（草稿上以绿色标出）。

在后来的修订版中，牛顿通过粗略查阅星表以弄明白前四等星的数目：15或16、63、220以及500（以黄色标出）。当意识到这些数字太大时，后面两等星的数目他就不再开列。在深入思考应该如何做的时候，他重新检查了前面的内容，删去了所有提及五等和六等星之处（以绿色标出），并把6改成了4。

宇宙论者中，牛顿并非惟一对银河系缺乏兴趣的人。）

牛顿的均衡宇宙在观测基础上的不足最终被一位年轻的医生、同时也是一位文物收集者威廉·斯图克利（William Stukeley，1687－1765年）面对面地给他（给所有人）指出来了。斯图克利把太阳和恒星描绘成分别形成的球状星团，环绕着星团的是一个平环，平环与星团之间是一无所有的虚空，银河系的恒星就聚集在平环里。斯图克利的恒星系统从外部看上去就像土星（球状星团）和土星环（银河系）。大约在1720年左右，斯图克利在一次同牛顿的交谈中向他提出了这一宇宙模型，而牛顿这位伟人对此的反应是郑重其事地向他暗示自己的模型的优越性，向他讲述对称地分布着无数恒星这种宇宙模型的好处。

然而，斯图克利却要使宇宙论沿着通向现在被称为“奥伯斯佯谬”的道路前进。他的注意力没有集中在引力效应（斯图克利的上帝通过不断地创造出新的恒星而使银河系处于永久的扩张状态，这使得他的宇宙无法用引力效应进行探索），他关注的是全部恒星所发出的光。他向牛顿指出：如果恒星系是均衡的、无限的，那么“整个天空半球就应当都具有像银河系那样明亮的外观”。牛顿对这一问题找不到答案，他只好像所有的明哲在这种情况下都会做的那样，对此不置可否。

在1721年早期，斯图克利在新上任的皇家天文学家哈雷的陪伴下与牛顿共进早餐。他们谈论的话题是天文学。斯图克利说了什么我们无从知晓，但对他而言，提及其宇宙理论将是自然而然之事。几天后，哈雷向皇家学会宣读了关于宇宙论的两篇短文中的第一篇，其中提到“我最近听到另一场争论，如果恒星数量是无限的，在天球的整个表面看上去都应该是明亮的”——他的这种表述方式与斯图克利非常接近，其中“最近”一词一定来自于他们前几天的早餐。

接着，哈雷开始提出一种（荒唐的）论证，他的论证意在说明，在一个均衡的宇宙里，远处的恒星不管其数量有多少，它们发送给我们的光也只能是可以忽略的有限量。哈雷对上述争论做出了反应，但其反应的具体细节则含糊不清，但是比他那解说更重要的是这样的事实：随着哈雷的两篇短文在《皇家学会哲学会报》上的发表，对于牛顿的恒星均衡分布宇宙模型的讨论最后终于——以不具名的形式——进入了公众领域。

对这样的宇宙中的光的行为的简洁而又精确的分析出现于1744年，是瑞士天文学家谢西奥克斯（J.－P. L. de Cheseaux，1718－1751年）做出的。谢西奥克斯指出，在一个恒星分布均匀对称的宇宙中，在两倍于地球近邻恒星与地球之距离处，可分布的恒星数可多达原来的4倍（因为球面面积与半径的平方成正比）；但是数量上的这种增加被每一恒星的视亮度只是其实际亮度的1/4（因为光的减弱与距离的平方成正比）这一事实精确地抵消掉了。这就是说，该处可容纳多达4倍的恒星，但每一颗的亮度都减弱到其原先视亮度的1/4。因此，总体来说，离地球最近的恒星对夜晚天空的亮度的贡献与位于两倍距离处的恒星的总发光量完全相等。

对这一争论的总结表明，恒星是分布在由近到远的不同距离上的，这一点大家都同意。由此，读者可以想象出来，考虑到越来越远处的恒星的光线的作用，夜晚的天空会逐渐被光线所填满，最后整个天空会变得像阳光一样明亮。

只要看一眼夜间的天空就会发现，真实的宇宙中并未发生这种现象。为什么会是这样？谢西奥克斯觉得这是一个显而易见的问题：他假定恒星发出的所有光线都到达了其终点。然而，如果空间的透明度不够完美的话——可以肯定真实的宇宙必然如此，那么当光线穿越给定的距离时，就会损失掉一定比例的光。当剩余的光继续前进同样的距离时，它还会按同样的比例继续损失，余下的光再前进时也同样如此，这一过程可以一直类推下去。由此，即使光线在这样一个距离上的损失很小，但当这种损失一而再、再而三地反复发生时，其累计效应就会变得足够的大，以至于来自遥远的恒星的光线几乎全部在路途上损失掉了。因此，这种恒星对夜晚天空亮度的贡献是微乎其微的。

德国的退休医生、业余天文学家奥伯斯（H. W. M. Olbers，1758—1840年）也持类似观点。他的观点写于1823年，这次是发表在拥有广泛读者的《柏林大众天文学杂志》（Berliner astronomisches Jahrbuch）上。奥伯斯证明了当光线从一颗恒星到下一颗恒星的过程中即使只损失了1/800的光，这一损失也足够用来解释夜晚天空的黑暗了。

到了19世纪中叶，物理学家们对能量守恒有了足够的认识，他们开始意识到如果光线被星际介质所吸收，那么，这种介质本身就会被加热，并向外辐射光。因此，谢西奥克斯－奥伯斯的解释不再成立。但是，人们又提出了其它一些可能的解释——例如，在一个星系与另一个星系之间存在着以太真空，没有光线能够穿越这种真空。这样，在19世纪与18世纪一样，人们可以轻而易举地解释夜晚天空的黑暗问题。只是到了我们自己所处的这个时代，它才在人们对宇宙论的思考中扮演了一个举足轻重的角色。

18世纪的玄思宇宙论

在18世纪早期，对斯图克利和皇家学会圈子里别的玄思者而言，要理解恒星宇宙并非一件容易的事。除了银河系，恒星看上去散布在整个天空，没有任何意义。但这种无序也许只是一种表面现象，不是真实状况。毕竟哥白尼已经证明，行星的混乱现象只不过是我们从运动的地球这一不利位置上观察其有规则的运动时所得到的表面印象。

但是恒星次序该以什么形式出现呢？斯图克利私下里曾不止一次试图证实它。其它的尝试同样是由个人私下里完成的（同样不太可能成功），这个人是自学成才的巡回讲演人、英格兰北部达拉谟的托马斯·赖特（Thomas Wright，1711－1786年）。1734年，赖特准备做一次关于宇宙论的讲演，同时也有些布道的味道。赖特相信太阳和别的恒星占据的空间呈现球壳形状，球壳外部是黑暗的外层空间，在那里魔鬼至多能从远处瞥上一眼围绕在上帝寓所周围的那些恒星星云。

如果恒星是静止的，其体系在相互引力的自由下将会崩溃，恒星将会落入上帝的寓所。但这是不可能的，因为太阳和别的恒星在环绕上帝寓所的轨道中做着无休止的运动，这将使它们得以避免上述厄运。

赖特试图解释在这种恒星宇宙模型中银河系所呈现的面貌，但他后来意识到在他的解释中存在着缺陷。最后，他找到了绕过困难的方法，实际上是两种选择

达拉谟的托马斯·赖特

托马斯·赖特在他的名字前加上了"达拉谟的"字样，以与他那个时代的同名者相区别。他于1711年9月22日在那个城市附近出生，13岁那年当了一个钟表学徒工，又因为受一件丑闻的牵连而被迫离开了他的师傅。在一些冒险之后，他回到了家里，在家里自学航海，接着在森德兰港口教海员这门课，这使他开始了他作为巡回教师的生涯。他从一个城镇到另一个城镇，为人们进行物理科学的公开讲演。与此同时，他还为那些贵族们提供理财建议。

赖特有一个机敏甚至是怪僻的大脑，他出版了大量的天文学、考古学和建筑学著作。1762年，他退休回到家乡，于1786年2月25日在家乡去世。

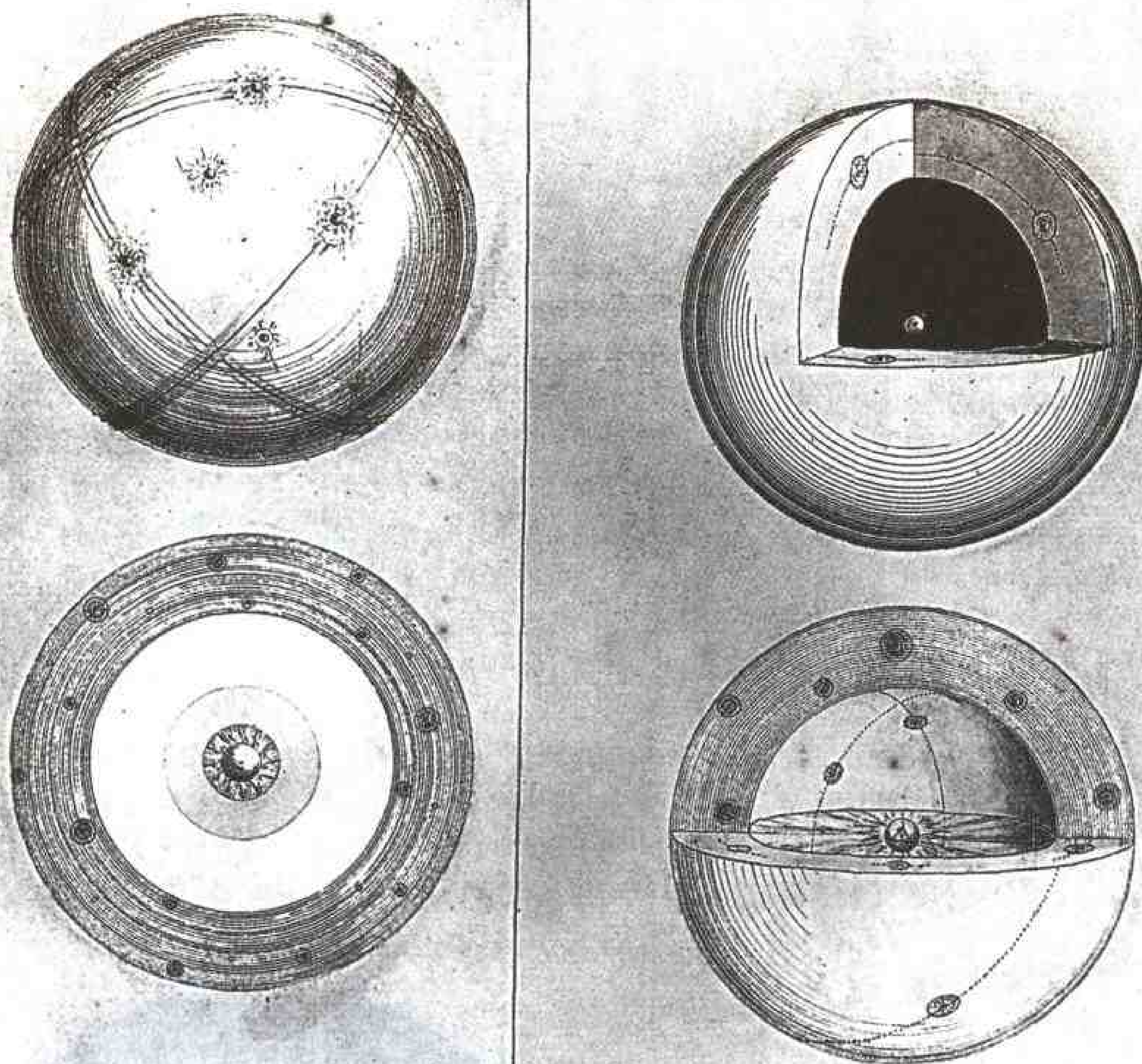


托马斯·赖特的雕刻，放在他的主要著作之前。衔着自己尾巴的那条蛇象征着无限。在这幅雕刻中，赖特宣称自己是一位自然哲学和数学教授。他确实在1742年受到圣彼得堡的邀请，要他去当航海学教授，但在薪金问题上双方没有达成协议，他因而没有成行。

右页图：赖特为表述他最早的关于宇宙的构思而做的四次尝试。上帝创造出来的所有物质都围绕在上帝的住所附近，太阳以及别的恒星分布在中心的四周，以球层形式占据了一定体积的空间。任何一颗恒星如果最初被创造出来时是静止的，别的恒星的引力会立刻使它落向上帝的住处。为了防止这种现象发生，恒星在被创造之始就被置于固定的环绕上帝住处的轨道之上。这些图形是那些最早描绘恒星运动的图形中的一部分。

方式，1750年，他在一本漂亮的名为《关于宇宙的一个新颖理论或曰新的解说》的书中，对其做了详细说明。

在他所喜欢的解决方案中，太阳再一次成为无数恒星中的一员，这些恒星一道形成了环绕中心神（或者更确切地说，既然现在有许多这样的体系和中心，应该是环绕我们的中心神）的球形体系。我们这个体系里的恒星所占据的球壳空间半径巨大——这个空间是如此巨大，以至于直接环绕着我们的那一部分（其恒星可被天文学家实际上看到）看上去成了平的。



但球壳本身却很薄，这导致了当地球上的人们从他们位于球壳内的位置上向内或向外看时，他们的目光很快从恒星层上掠过而进入虚空之中，结果是在其视线的方向上，只能看到一些比较近的因此也是比较亮的星。作为对比，当他们在球壳自身里边环顾四周时，他们的视线首先遇到的是近邻的恒星，然后是越来越多的较远的和更远的恒星；这些无穷多的恒星的光融合成了银河系的外观。因此，银河系的平面实际是这个球壳的切平面，切点就是太阳系所在的位置。

赖特认识到还存在着一个可作为代替的模型，该模型可对银河系做出解释。

在这个另一种可供选择的宇宙模型中，赖特把恒星描绘成定位于环绕上帝寓所（图中画成一个球）的扁平环中。我们实际上能看到的恒星形成盘状体系，存在于扁平环内某处。当观测者在沿着环的方向看上去时，他就会看到银河系现象。

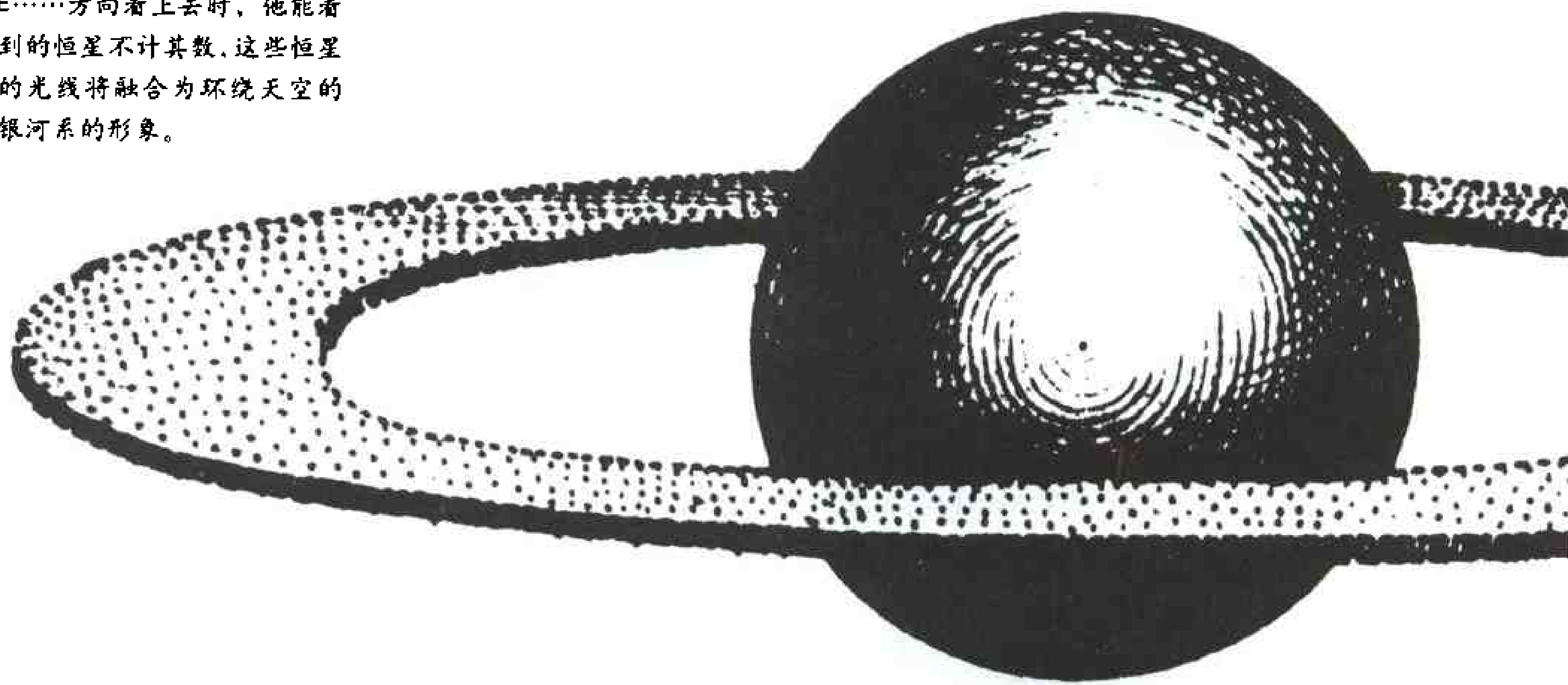
在这个模型中，我们的恒星系形成了一个环绕着我们的中心神的扁平环。这些恒星实际上是我们能看到的，它们占据了位于环的一侧的一个盘状空间。但究竟什么因素促成了上帝选择这个特别平面来放置这个环，对此该模型没有提供解释。由于它的竞争对象球对称模型没有留下这样的把柄，因此赖特首选的是球状模型。

撇开上下文不顾，赖特把银河系解释成我们处身于恒星层中所看到的光学效应，现在听起来这够惊人的了。但是这一见识已经深深地植入了神学宇宙论之中，这种宇宙论简直可视为稀奇古怪的代名词。赖特的著作如果不是在出版之后的几个月里被一家汉堡的杂志为其做了摘要登录的话，其影响本来是要小得多的。

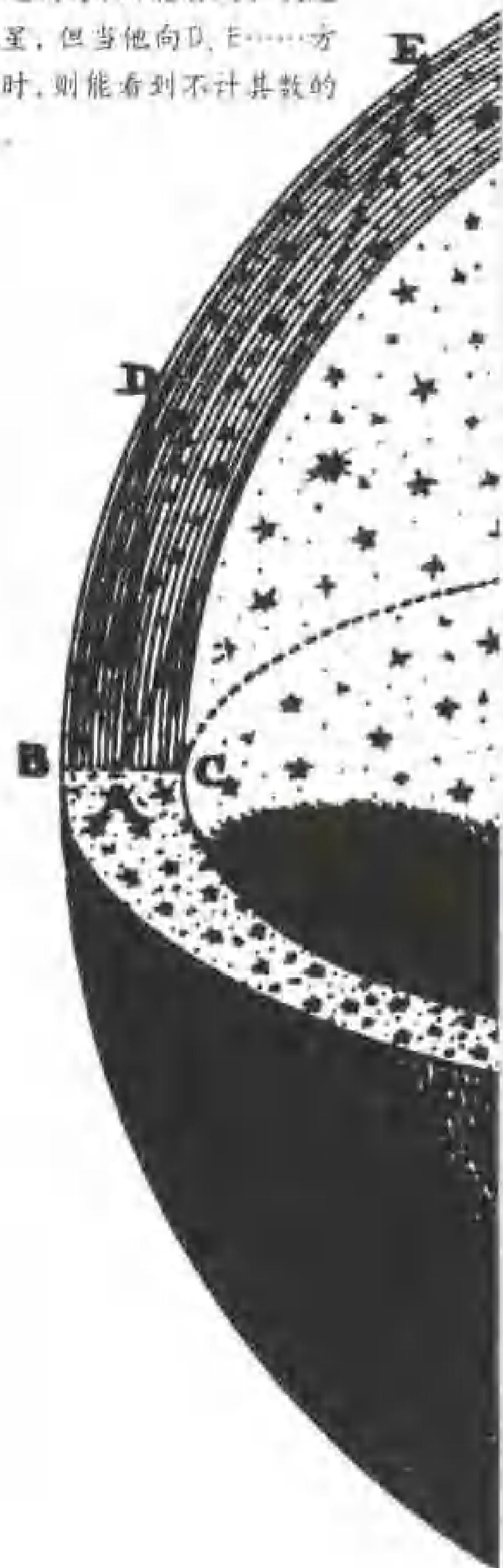
那本杂志登录的这篇摘要碰巧引起了一位德国大哲学家康德（Immmanuel Kant，1724－1804年）的注意。现在，历史学家们即使借助于手头的插图，也要花很大力气才能理解赖特想要说什么，如果没有插图的话，要理解他的意思几乎毫无希望。康德不相信赖特会非常认真地提出这样一个宇宙，在这个宇宙中有无穷多的中心神住所，在每个住所周围都环绕着它自己的恒星系。相反，他认为赖特想的一定是上帝住所是单一的，远离我们所在的这个星系，因此它与我们对这个星系的讨论无关。康德因此相信赖特为了说明银河系的外观，提出了两个供人们选择的解释；这两个解释在自然秩序方面都是完整的：一个涉及到了占据球壳空间的恒星，另一个则是恒星存在于扁平环空间之中。对于赖特而言，环的中心必然是虚空，没有恒星，因为那里是我们的中心神所在处。康德误解了赖特的意思，认为恒星没有理由不跨越中心区连续分布，因此他把那个环改成了一个连续的盘。

右页左图：赖特用过的一幅略图。他用这幅图帮助读者理解他对自己所选择的宇宙模型的解释。在这幅图中，太阳和别的恒星被夹在两个平行平面（他的读者看到的是平面的边缘，该边缘为恒星的两侧提供了垂直边界）之间，A处基于地球的观察者在向诸如B或C的方向看上去时，将只能观察到少数近邻恒星。但当他在沿着夹层方向例如D、E……方向看上去时，他能看到的恒星不计其数，这些恒星的光线将融合为环绕天空的银河系的形象。

那么，究竟我们的星系是球状的，还是盘状的？康德相信宇宙中存在着别的类似的恒星系，其中一些已经被法国人P.L.M.德·莫佩图斯观察到具有椭圆状的轮廓。盘在斜视情况下确实呈现椭圆状，但球不管怎么看却总是圆的。因此，莫佩图斯看到的星系是盘状而不是球形的，对于我们的星系（银河系）情况也必然



右下图：赖特首选的模型，使得让我们能够看到的那些恒星形成了巨大的球形体系上的一小段，该球形体系的直径是如此之大，以至于我们所看到的这一小段的两个边界成了两个近似平面。另外，位于A点的观测者在向B或C方向观测时，只能看到少数近邻恒星，但当他向D、E……方向看时，则能看到不计其数的恒星。



同样如此。通过这样的推理，终于得到了关于银河系的第一个基本正确的模型。

与此同时，别的宇宙论者已在工作。法国阿尔萨斯人约翰·海因里希·朗伯（Johann Heinrich Lambert，1728－1777年）终生都游离在科学共同体的外围，他对稳定的、“时钟式”的宇宙坚信不疑。当他对我们的宇宙是如何构成的这一问题发展了自己的思想的时候，他不知道哈雷1718年的著作已经宣布发现了一些恒星的自行。但是，他不像牛顿那样，他意识到最近的恒星与我们之间的巨大的距离本身就已经削弱了它们被赋予的那种“固定不动性”。

朗伯的宇宙结构是分层的，层数巨大但却是有限的：月亮、行星、恒星、恒星云、星系……在任何一个给定的层次上，其组成单元都包含了有限的低一层上的成员，这些成员每一个都在环绕一个中心物体的稳定轨道上。银河系由恒星云组成，每一个星云都像行星绕着太阳转一样环绕银河系的中心物体运动。

这些思考者没能使其著作大量发行，因此对他们的影响很难做出评定。然而一连出版的这三部关于宇宙论的专著却表明，当职业天文学家还在全神贯注于太阳系时，一些游离于他们范围之外的人士却已经觉得需要在“大尺度”上去理解宇宙了。英格兰北部的一个逃亡的音乐家为回应这种需要做出了自己的努力。

威廉·赫歇尔和天的结构

威廉·赫歇尔（William Herschel，1738－1822年）是在汉诺威长大的。由于七年战争的缘故，他于1757年作为一个逃亡者来到英国。在英国，他一开始为了糊口而挣扎，但到了1766年，他时来运转，被任命为旅游胜地巴思的一个礼拜堂的风琴手。

这种新的安定性使他有机会扩展他的兴趣。他钻研了剑桥的罗伯特·斯密斯（Robert Smith）的两卷本的经典著作《光学》（Opticks），这是一部能够在理论上和安装望远镜、显微镜等实践方面对读者加以引导的光学著作。斯密斯用了名为“望远镜对恒星的发现”的一章对其著作做了总结，这些段落唤起了赫歇尔在天文学方面的雄心。

1772年，赫歇尔访问了汉诺威，当时他的父亲已经去世，他劝说他的母亲允许他那天才妹妹卡罗琳（1750－1848年）随他回到巴思。卡罗琳希望做一个歌唱家，但威廉现在已经被天文学所迷住，因此卡罗琳的角色很快就清楚了：为她哥哥操持家务（直到他终于于1788年结婚为止），夜晚当他哥哥在望远镜前观察时则做她哥哥的记录员和合作伙伴。

第二年，赫歇尔买了一部《对伊萨克·牛顿爵士的原理的天文学解释》（Astronomy Explained upon Sir Isaac Newton's Principles）。该书是当时天文学普及作家詹姆斯·弗谷森（James Ferguson，1710－1776年）所写的畅销书。这部书对增加他那零碎的恒星天文学知识没有做出多少贡献，但把他领进了宇宙论一些广泛的问题中了。弗谷森与他同时代的许多人一样，认为所有的行星系以及恒星都是“为其合理的居民提供食宿”的，甚至彗星（威廉·惠斯顿一度曾认为彗星上“为折磨那些可恶的罪犯而充斥着永恒的冷热交替”）也可能住满了能够欣赏上帝手艺的生物。赫歇尔甚至要把关于宇宙的这一通俗见解推广到太阳上去，一开始他相信太阳像行星一样是凉的，它被云层包围着，云层保护着太阳上的居

威廉·赫歇尔



弗里德里希·威廉姆·赫歇尔（Friedrich Wilhelm Herschel）在历史上以其英国化的名字威廉·赫歇尔（William Herschel）而闻名。他于1738年11月15日出生于汉诺威，14岁那年，他随同父亲成了汉诺威军队的乐队成员。随着法国取得了七年战争的胜利，赫歇尔流亡到了英国。他当时还是个孩子，不受誓言的约束，可以自由离开。在英国他艰难地谋生，先是在伦敦演奏音乐，后来又在英国北部做音乐教师和风琴手。

然而，到了1766年，他被任命为巴思时髦的八角教堂的风琴手。尽管他的音乐职责增加了，但由于有了足够安定的生活，他得以发展他在其他方面特别是天文学方面的兴趣。他把主要的空闲时间用于建造一架大型反射望远镜，这架望远镜孔径足够大，能够看到遥远的昏暗天体。他把建造这架望远镜作为实现他研究广大宇宙的雄心的一部分。他的命运的转折点发生在1781年，这年他偶然发现了当时不为人们所知的行星天王星（见第177页），并辨识出它不是一颗普通的恒星。这一发现使得他的朋友们有机会劝说国王给他提供年金，这样他就能献身于天文学研究。1782年，他搬进了温莎城堡附近的达契（Datchet），四年后，又搬到了斯劳（Slough）附近并在那里度过了余生。

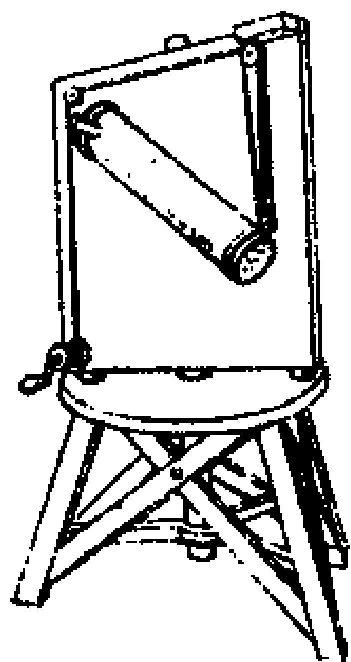
他在天文学方面的忠实助手是他的妹妹卡罗琳（Caroline）。卡罗琳同时也帮他操持家务，直到1788年赫歇尔结婚为止。1792年，他的独生子约翰（John）出生。威廉·赫歇尔于1816年被授予爵士称号，1822年8月25日于斯劳去世。

民不受其外层火球的伤害，太阳黑子是人们透过火球的间隙所瞥见的云层。

弗谷森不是牛顿，出于对神学教理的坚信，他认为不管何时出现混乱，上帝都会加以干涉，恢复太阳系或恒星宇宙结构。他写道：宇宙“将会如其制作者所愿而延续下去，人不应该只批评那些容易腐烂的书本，而应该去关注人类的存亡。”赫歇尔对他的教诲耳熟能详。

为了看到斯密斯和弗谷森描述过的那些天体，赫歇尔最初用折射式望远镜做了尝试。但是折射式望远镜的孔径受到了严格的限制，因为要为它制造出具有合

卡罗琳·赫歇尔



1783年威廉为卡罗琳制作的"彗星搜寻器"。威廉后来写道："它是如此的与众不同，它可以在适当的距离上，以2000的放大倍数辨识字母；它移动起来非常方便，可以在眼睛保持不动的情况下对从水平到铅直的范围进行搜寻。"

卡罗琳·L·赫歇尔1750年3月16日出生于汉诺威，1772年被她的哥哥威廉·赫歇尔带到了英国。她在威廉的天文学工作方面担当其助手长达半个世纪，直到1822年威廉去世为止。在早期的岁月里，当威廉在磨镜的时候，因为担心镜会变凉而不敢将手松开使之中途停止时，她甚至为哥哥喂饭。后来，一到晚上，当他哥哥对天空的星云进行"扫描"时，她就坐在望远镜旁的一张桌子前，将她哥哥对星星的描述记录下来。对于威廉的工作来说，她是非常重要的，因此在1787年，国王为她提供了50英镑的年薪。

她自己也成了一个熟练的"彗星发现者"，尽管她的观测工作只能在她自己的空闲时间里进行。即使如此，她还是在1785年发现了她的第一颗彗星，1788年发现了第二颗，1790年早期又发现了另外两颗。

1791年，威廉为她制作了更精良的"彗星搜寻器"。这是一架相当大的仪器，孔径9英寸，焦距5英尺，其放大倍数虽不高，但视场很大，适合于搜索彗星。如同其前任一样，这架仪器的装备是简单的，但对于其目的而言却是有效的。卡罗琳在观测时，只要把它指向水平，然后摇动一个把手，把管子从水平位置降到铅直位置，就可以目不离镜而将天空从水平到铅直的一段全部扫视一遍。然后她把仪器对着一个新的方向，再扫视这段新的天空。用这种方式，她可以在4个晚上把全部可见天空扫视一遍。1791年后期她发现了第五颗彗星，1793年发现了第六颗（这颗已经被查理斯·梅西叶发现），同年又发现了第七颗（现在被称作恩克彗星的再现），1797年发现第八颗。

卡罗琳白天的工作同样很辛苦，通常是为以前晚上观测到的星云准备校正本。根据威廉的要求，她通过编纂弗拉姆斯提德观测到而又在其星表（以及一个正误表，表中的"星"实际上从未被观测到过）中被忽略了的恒星目录，改

适质量的透镜面临着巨大的困难，还需要高昂的费用。要造出能够满足赫歇尔雄心的那种尺寸的透镜，在技术上是不可能的。为了为他的宇宙论探索寻找合适的武器，赫歇尔转向了反射式望远镜。在这种望远镜里，光线落到镜筒底部的反射镜上，被反射到焦点处。反射镜是完全有可能被制造出来的，因为斯密斯的书已经告诉他如何磨镜了。

到了1773年年底，他已经预定了一组盘片，其中一个是用来制造焦距为5.5英尺的反射镜的。正是由于使用了这架仪器，他于1774年3月1日决定开始写"日记"，即观测日志。该日志的首页（如本书第222页图所示）对任何观测天文学家的观测生涯来讲，一定是最富有启示性的一页。

哈雷在其1715年的皇家学会《哲学会报》（Philosophical Transactions）中记述了天空中现在被称之为"星云"的6团乳状斑块，斯密斯在其《光学》中讨论了这些斑块。"星云"这个词只是表明其所指对象具有云雾状的外观，并不涉及对其物理性质的判断。

进了弗拉姆斯提德的“不列颠星表”中的恒星的可靠性。她的《从弗拉姆斯提德观测资料中发现的恒星目录》一书于1798年被皇家学会出版。

威廉一去世，她就回到了汉诺威。她在天文学方面继续做的工作是重新编排威廉的星云表，以使她的侄子约翰在校验这些星云的时候能够用上它。为此，她得到了皇家天文学会的嘉奖。她于1848年1月9日在汉诺威去世，享年98岁。



现在人们所知的卡罗琳·赫歇尔惟一的一张年轻时的画像。这张侧面影像是她1772年离开汉诺威到英国威廉那里之前画的。汉诺威的一位居民后来把它交给了英国的一位收藏家。

关于这一点，曾经有过长期争论。显然，当用放大倍数不够大的望远镜去“分解”星团时，遥远的星团看上去就成了星云。问题在于，是否也有由某种弥漫的发光流体形成的真正的星云，或者是否所有的星云都仅仅是呈现在地球上的观察者面前的一种表面现象，它们只不过是一些星系，其真实本质被其巨大距离掩饰起来了。哈雷赞成前一种观点：星云“实际上只不过是来自极其巨大的以太空间中的光，它穿过透明而又弥漫分布的介质，靠它自己的光而闪耀”。

观测可从两个方面对解决这一争论有所贡献：首先，一架放大倍数更高的望远镜有可能成功地将组成星云的恒星分解成一个星系，而这个星系在用次一些的仪器观测时看上去就成了星云；其次，如果一个星云的形状从一个十年到另一个十年甚至从一个世纪到另一个世纪的时间内发生了变化，那么这个星云就可能不是星系。毕竟，如果它是一个星系的话，观测者看到它弥散在天空，它一定范围

威廉·赫歇尔观测日志的第一页上的一条。1774年3月4日，他观察了猎户座星云，并将其与他多年前所看到过的在罗伯特·斯密斯的《光学》中描绘过的该星云的梗概做了比较。看来该星云的形状发生了变化，赫歇尔很快就认识到这一事实对于理解它的物理本质具有重要的意义。

4th Saw the lucid Spot in Orion's Sword, thro' a 5½ foot Reflector; its Shape was not as Dr. Smith has delineated in his Opticks; tho' something resembling it; being nearly as follows.



From this we may infer that there are undoubtedly changes among the fixt Stars, and perhaps from a careful observation of this Spot something might be concluded concerning the Nature of it.

广大；同时，它的距离又很远，远到我们不能探测到组成它的一个个恒星，那该星系一定极其庞大，庞大到无法迅速改变其形状。

赫歇尔熟知斯密斯在其《光学》中描绘的那幅粗糙的猎户座星云的略图。该

太阳系之外的引力

伊萨克·牛顿在其《原理》(1687年)中，提供了最强有力的证据，证明引力在整个太阳系中发挥着作用。1758年哈雷彗星从已知的最外层行星之外的空间的回归，进一步证明了这一点。但牛顿没有提供证据证明引力在恒星中间也发挥着作用。

最早做这件事的是剑桥地质学家和天文学家约翰·米歇耳（John Michell，约1724－1793年）。在1767年的一篇论文中，米歇耳用了一个数学参数来表明，双星是如此之多，它们不可能都是仅仅由于偶然地排列在从地球上看上去的同一方向上的结果，它们中的大部分实际上必然是按一定规则联结在一起的伙伴（"双星"）。这同样适用于像昴星团那样的星团。

1802年，威廉·赫歇尔开始重新检查他二十年来曾发现的那些双星。他发现其中的一些双星的两个伴星的相对位置发生了变化，这表明它们的确是被某种引力约束在一块儿的。

但这种力是否就是牛顿的引力呢？这方面的必要的证据直到下一代人也没有找到。最后，到了1827年，巴黎的天文学家菲利克斯·萨瓦里才证实，大熊座ξ的双星在围绕其引力中心的椭圆轨道上运动，与牛顿理论所要求的一样。

图是惠更斯1656年绘制的，斯密斯又把它绘制到了自己的书中。赫歇尔用自制的反射式望远镜观测该星云，认定它的形状一定发生了变化，他立刻看到了其中的寓意："由此我们可以推知，在这些恒星中毫无疑问发生了变化。通过对这团星云的仔细观测，也许对其本质可以得出某些认识。"

对于风琴演奏家、作曲家、指挥家和音乐教师赫歇尔来说，那些年是繁忙的年头，他把他能够用于天文学的有限时间的大部分都贡献给了改进他的望远镜上。不过到了1779年，他觉得他应该去熟悉那些明亮的恒星了，于是他使用他自己制作的那架焦距为7英尺长的望远镜（见第177页），对恒星一颗一颗地做了系统的考察。然后，他开始了第二次这样的"复习"，这次要更加彻底，而且增加了一个目标：辨认出可能用伽利略方法探测周年视差（见第198页）的双星来。

在这次观测中，赫歇尔辨认出了269个双星和多星；他的第三次系统观测辨认出了434个，比其他观测者所知增加了许多倍。他把一种新的方法论引进了天文学。那些在科学方面接受过正统教育的人们知道，天文学家的工作就是研究那些人们熟悉的星：太阳、月亮、行星以及它们的卫星、彗星、明亮的恒星等，它们都有自己的名称和特征。赫歇尔开始扮演自然史学者的角色，大量收集标本，对之加以统计和分类。很快，他就能根据星云在其生活周期中所达到的阶段对其进行整理了。

与此同时，这位杰出的风琴演奏家的见解在天文学界流传了起来。天文学家

18世纪的黑洞

有没有这种可能，有的天体由于质量太大了，它的引力会阻止任何光线的逸出，因而人们无法看到它？对此，18世纪晚期人们讨论了好几次。最早探讨这一问题的是约翰·米歇耳。在1784年的皇家学会《哲学会报》的一篇论文中，他推测如果一颗恒星的密度与太阳相同，而其半径是太阳的500倍的话，"从这样的天体发出的所有的光线，将会由于其自身引力的作用而折返回去。"然而，这样的天体也许会因为对临近天体的吸引作用而暴露其行踪：

但是，如果有任何别的发光体正巧绕着它们运转，我们也许仍然可以通过这些发光体的运动，推断出中心物体的存在的可能性，因为这可能提供一个线索来解释这些天体运动的明显的不规则性，这种不规则性用别的任何假设都不容易解释。

威廉·赫歇尔接过了这一主题，并把它用在了宇宙论上。1791年，他写了这样一段话："所有恒星系的引力间的合力有着巨大的相互抵消作用，当（光的）粒子竭尽全力飞离其所属的星系时，这些引力一定会持续不断地向这些光粒子施加作用。"

由于拉普拉斯（1749－1827年）于1796年在其《宇宙体系论》中得出了与米歇耳类似的见解，上述观点才被公众广泛知晓。但是在该书的1808年版中，拉普拉斯从书中抽掉了这一命题，这可能是由于它与当时公认的光速是个常数的观点相矛盾的缘故。现在所谓的"黑洞"这一术语已经降到了一种颇为牵强的地步，这种状况一直持续到最近。

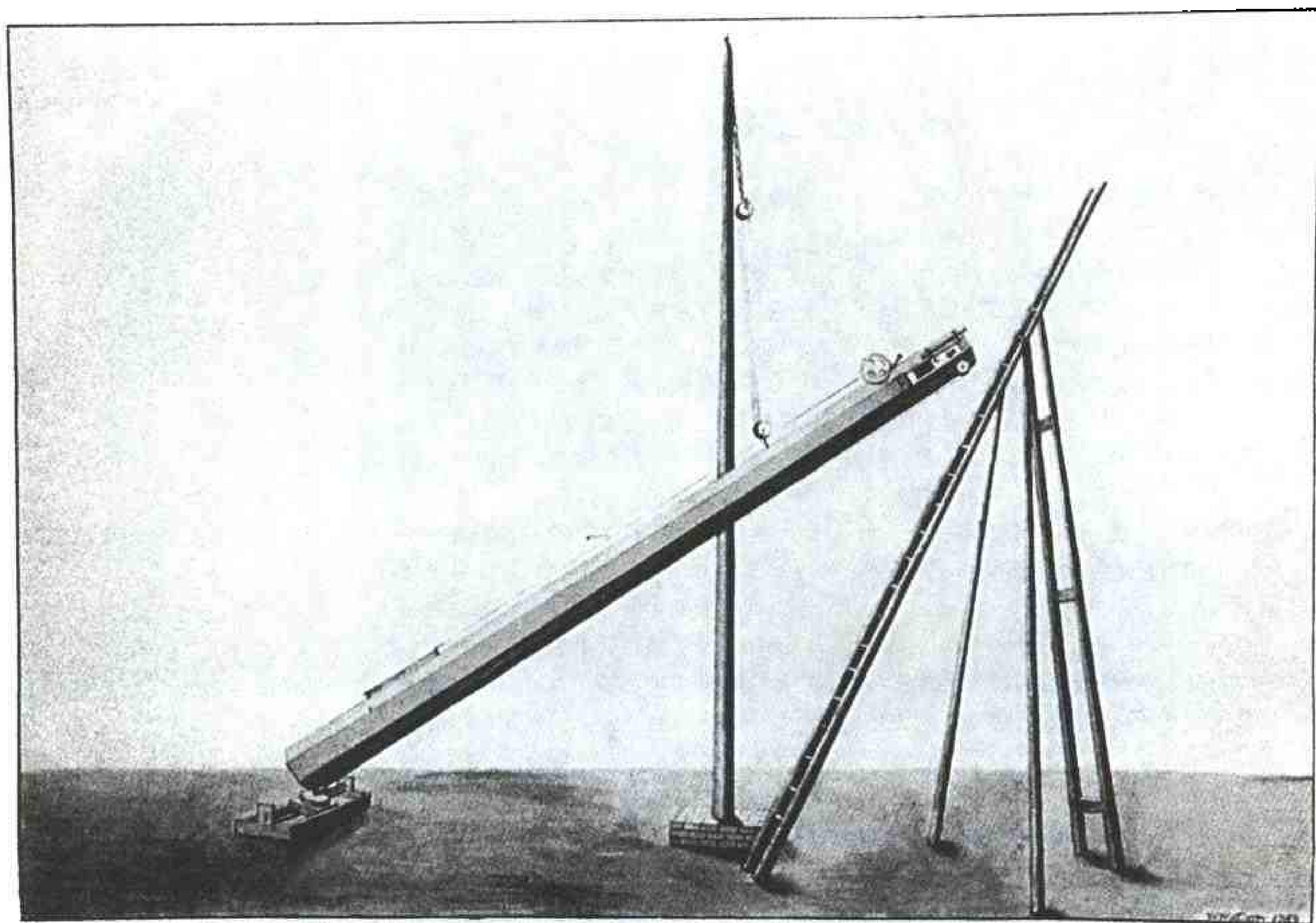
赫歇尔1776年制作的“小”20英尺反射式望远镜。其简单支架使人回想起17世纪的长焦距折射式望远镜(见本书第132页)。然而，它使得赫歇尔可以通过在筒的上侧的棘齿轮来调整竖直仰角。他还可以通过转动目镜下面的小轮使望远镜向左或右稍微移动，但要在水平方位做大的移动，他必须从梯子上下来，移动底座，然后再沿着梯子，上到目镜旁。

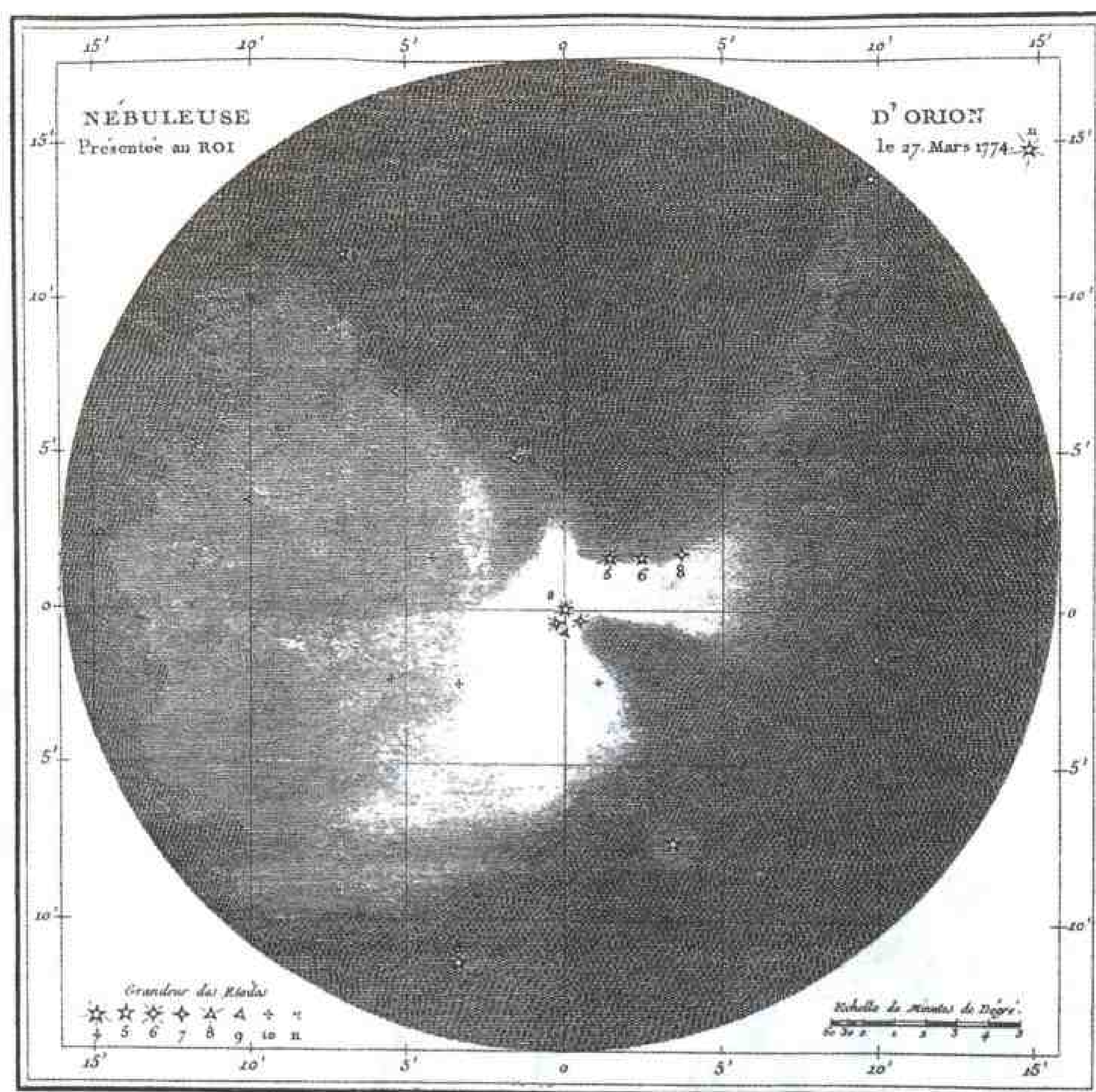
中的领袖人物登门拜访了他，承认了他的天才，还努力为他的未来铺平道路。但当巴思的一位邻居向伦敦的皇家学会转告了他的论文的时候，皇家学会的一些成员却对他所说的话产生了怀疑，再联想到他对基本工作程序和惯例的无知，于是就宣称他只适合呆在精神病院里。

然而，1781年在他对天空进行第二次全面观测的时候，他发现了天王星（见本书第177页），这对他是一个巨大的胜利，任何人对之都无法加以否认。很快，欧洲的天文学家人人都知道了赫歇尔。乔治三世国王本人是汉诺威人，他为赫歇尔提供了年薪，以使他能放弃音乐，专心致志地从事天文学研究。

在那个决定命运的晚上发现了一颗新的行星，这事远远出乎赫歇尔的意料，但该发现并非偶然：赫歇尔在对天空进行系统的搜索，他在望远镜制作和观测这两方面的高超技术使得他一眼看上去就能辨认出它不是一颗通常的星。望远镜制作永远是他作为一个成功的天文学家的基础，现在他成了一位职业望远镜制造者，他把制成的反射式望远镜出售，以补贴自己的薪水。

一架成功的反射式望远镜包含三个关键部件：首先是一个成型完好的反射镜——实际上是两个，这样当一个因暴露在夜晚的空气中而失去光泽，需要重新打磨时，另一个就可以作为代用；第二，具有一定放大倍数的目镜；第三，一个稳



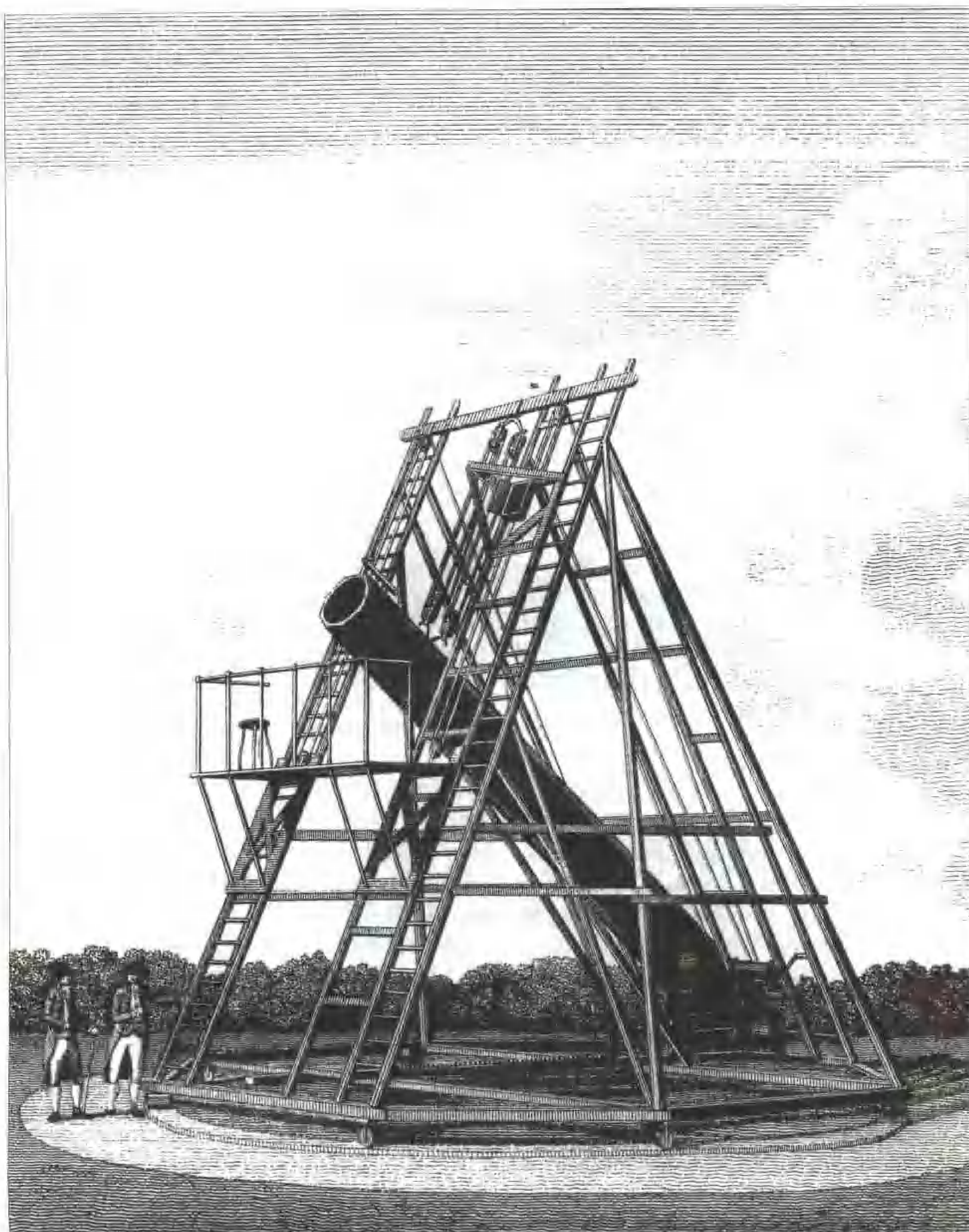


查里斯·梅西叶在巴黎的德·克隆尼客栈所画的猎户座星云图。如同赫歇尔一年后的发现一样，他指出了该星云的外观与以前天文学家所绘相比所发生变化的幅度，他希望他"倾注了极大精力"画出的这幅图能够有助于未来的天文学家对该星云的形状究竟是否发生变化做出判断。

定而又能进行调整的支架。即使在巴思时，赫歇尔那建造一架具有大"集光本领"的望远镜，以对遥远的因而看上去很昏暗的恒星进行研究的雄心，也超过了当地铸造厂的铸镜能力。但没有什么东西能够使他气馁，1781年，他改造了自己的房子，使它成了一个铸镜厂。他曾两次尝试铸造一个3英尺的镜片，这种镜片一旦铸造成功，将使这位风琴演奏家拥有当时世界上最大的望远镜反射镜片。第一次制作时，镜体在冷却过程中裂开了。第二次制作时，当熔化了的金属倒进石板铸模时，由于膨胀而四处飞溅。这一次，即使赫歇尔也不得不承认是个失败。

在制作目镜时，赫歇尔似乎轻而易举就获得了成功。确实，他的目镜的放大倍数达到了几百甚至几千，但他在引述其放大倍数时，并没有对其进行特别的评述，尽管对许多人来说，他的这些精心修饰过的陈述是不可思议的。

在安装大型反射式望远镜的过程中，赫歇尔充分证明了他极富创新性。他在1776年自己制作了一个20英尺的反射式望远镜，这架望远镜被用吊索悬挂在一个杆上，就像过去的年代里人们制造的折射式长筒望远镜一样。而一旦他自由地专心致志于天文学，他仅用了一年的时间就为自己建造了一架新的20英尺的望远镜。这一次他所用的反射镜的直径是18英寸的，而不是12英寸，更重要的是，支架是



稳定的，观测者可以很安全地站在一个平台上进行观测。

赫歇尔现在的装备使得他可以去探索星云之谜了。尽管他早年对猎户座做了观测，但到1781年12月，他仅仅又观察到了3个。这时他得到了一个包含有68个左右的星云和星团的星表，该星表是法国彗星猎手查里斯·梅西叶（Charles Messier，1730—1817年）汇集的。梅西叶是在搜索彗星的过程中发现了这些让他分心的不受欢迎的弥漫状天体的。（事实上梅西叶已经出版了一个包含了一百多个星云的星表，现在的天文学家们还在使用这个星表，当他们提到某一突出的星云时，都要用到字母M，后面紧跟的是查里斯·梅西叶给出的编号。）

赫歇尔做出了一个重要决定：使用那架新的20英尺反射式望远镜来搜寻在英国可见的整个天空，以搜集尽可能多的星云种类。一到可见度好的晚上，望远镜就被指向了南方，镜筒被抬升到某一特定角度，然后赫歇尔就让天空在他眼前飘过，等待着伏击任何一个进入他的视场的星云。当他看到跨越子午线的星云时，就将其口述出来，而卡罗琳就将他的口述记录下来，同时也记录下该星云与天北极间的夹角和经过子午线的时间。这项工作延续了长达20年的时间。到1802年，他们这个兄妹小组已经把已知星云数增加到了2500个。

但是是否所有的星云都仅仅是离开我们极其遥远的大星团，或者其中有一部分是真正的星云，它们形成了一种发光流体。在搜寻开始之前，赫歇尔曾像他所想的那样支持猎户座星云的易变性，因为他发现猎户座星云"令人惊讶地改变了"。那么，它一定是真正的星云了。但是，一般说来，人们如何才能将真正的星云与极其遥远的星团区分开呢？

赫歇尔曾注意到一些看上去呈现星云状的天体有一种均匀的乳状外观，而其它的则呈斑点状。他认为前者是真正的星云，而后者那种有斑点的星云状物则意味着它们是"可分解的"，换句话说，它们是星团，用放大倍数足够高的望远镜观测时，能把它们分解成为组成它们的一颗颗恒星。

到了1784年6月，一篇描述他现行工作的论文在皇家学会宣读。在这些天里，赫歇尔不期而遇看到了两个星云，这两个星云正巧与他刚刚公布的理论相矛盾，因为它们每一个都具有以上两种形状的星云斑。确实，对于其中的一个，他认为他仍然能够看到与那种可分解的星云相混合的星星。他把这些星星说成是存在于离观察者最近的星云中的，而那种由星星组成的可分解的星云则要远得多，它们离地球有点儿太远了，以至于不能一一看到其中的星星。可这样一来，那种乳状星云就不能仅仅由星星组成，而那些星星只不过是位于更远的距离上而已！难道它们一定要由那种发光流体所组成，就像赫歇尔迄今所假设的那样？

在忽略了他认为他曾经在猎户座星云所观察到的那种变化后，现在他放弃了发光流体的假说，反过来得出结论说所有的星云都是位于遥远距离上的星团。

但是星团意味着星簇，意味着星星由于它们的相互间的引力而聚集在一起。据此，在1785年皇家学会《哲学会报》的一篇划时代论文"论天的结构"中，赫歇尔"从时空两个方面的巨大距离出发"重新检查了这一主题。

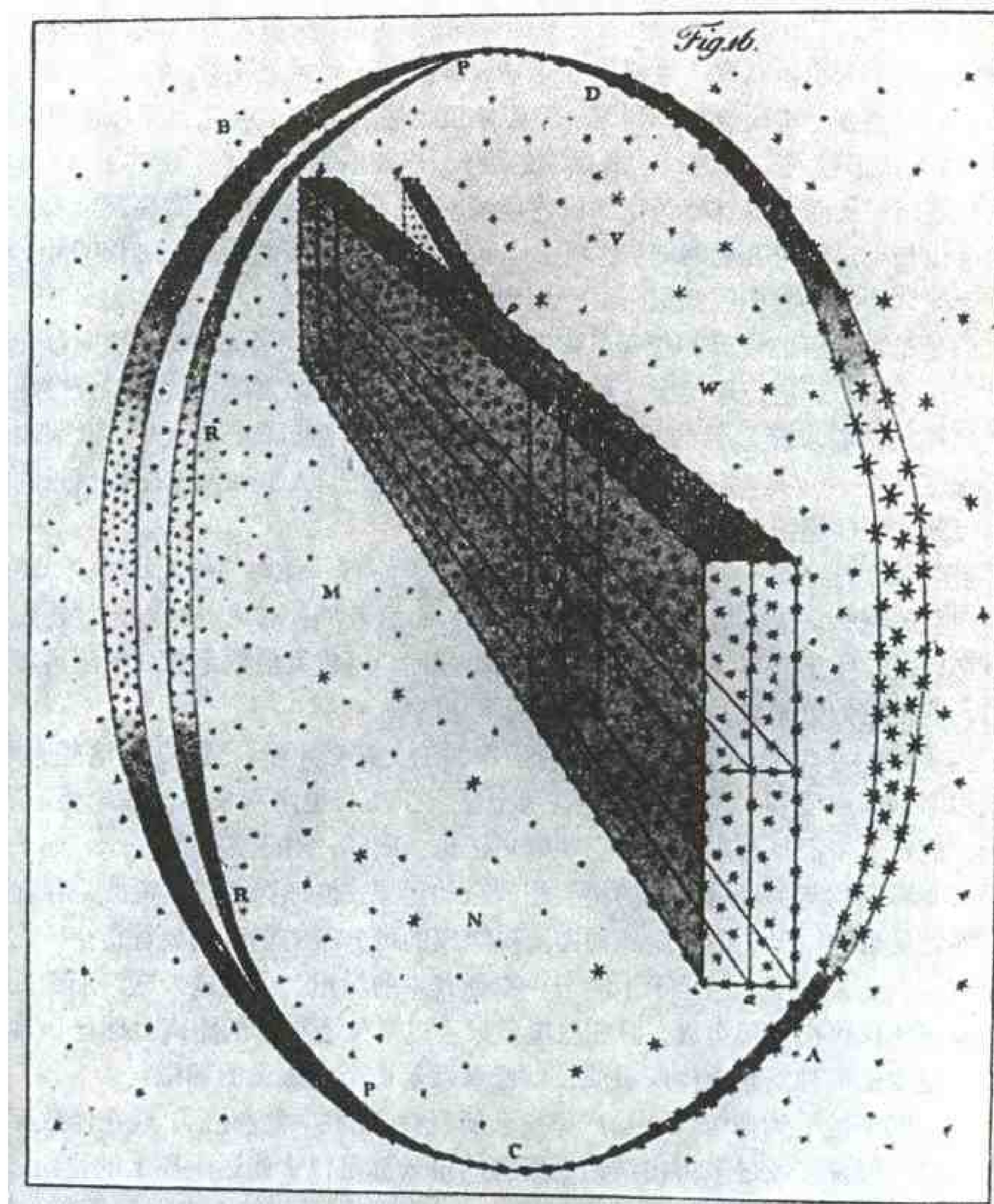
他设想宇宙一开始恒星的分布是相当均匀的，然后他又描述了引力是如何立即发挥作用，使星星在这里或那里聚集起来，形成各种形状的星团，如同他所观

威廉·赫歇尔的"大"20英尺反射式望远镜，完成于1783年。其反射镜大于原来的那架"小"20英尺反射式望远镜，但此镜主要的优点是其支架稳定而安全，同时又能被观测者所操纵。威廉在其长达20年的对星云的观测中，使用的就是这架望远镜。后来他的儿子约翰在他的监督下对镜面做了重新抛光。威廉去世后，约翰对其进行了改装，先是在英国，后来又在南非（见本书第238页）用它对整个天球做了观测。

赫歇尔的银河系图

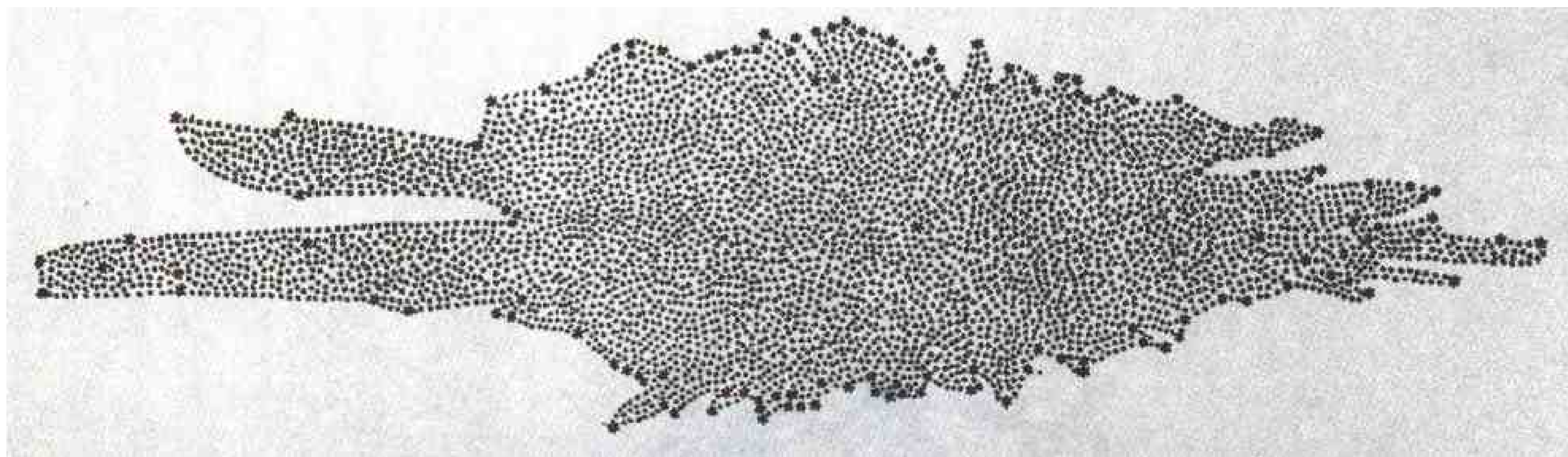
在1785年发表的一篇论文中，赫歇尔开了在天文学中应用统计学的先河，他证明了关于天空的自然史学家们仅仅通过计数星星就能达到的境界。他为自己设定的问题是判定我们这个星系——银河系的形状。

就像赖特、康德和朗伯一样，赫歇尔认为银河系是我们处于其中的恒星星



银河系及其解释。根据赫歇尔的观点，太阳和别的恒星组成了一个星层，银河系是地球上的观察者沿这个星层方向观察时这些恒星所表现出来的光学效应。图中的分叉是为了说明银河系在天蝎座和别处的分片现象。

察到的那样。他甚至还注意到了引力的持续作用最终有可能导致的引力坍塌问题，他补充说："这些星团可能是宇宙的实验室……这些实验室为宇宙整体的衰败准备了最有效的补救方法。" 与18世纪早期的稳定的时钟式宇宙观念相比，他的这些



由赫歇尔的恒星计数所导致的银河系横断面。太阳是位于中心附近的一颗恒星，其与图中表现为银河系边界的那些星星之间的（相对）距离由恒星计数的结果推断出来：在给定方向上的恒星数目越多，该距离就越大。注意左边的分叉。赫歇尔正在进行搜寻星云的工作，能抽出来的时间不多，只够为他的方法提供这样的有限例证。

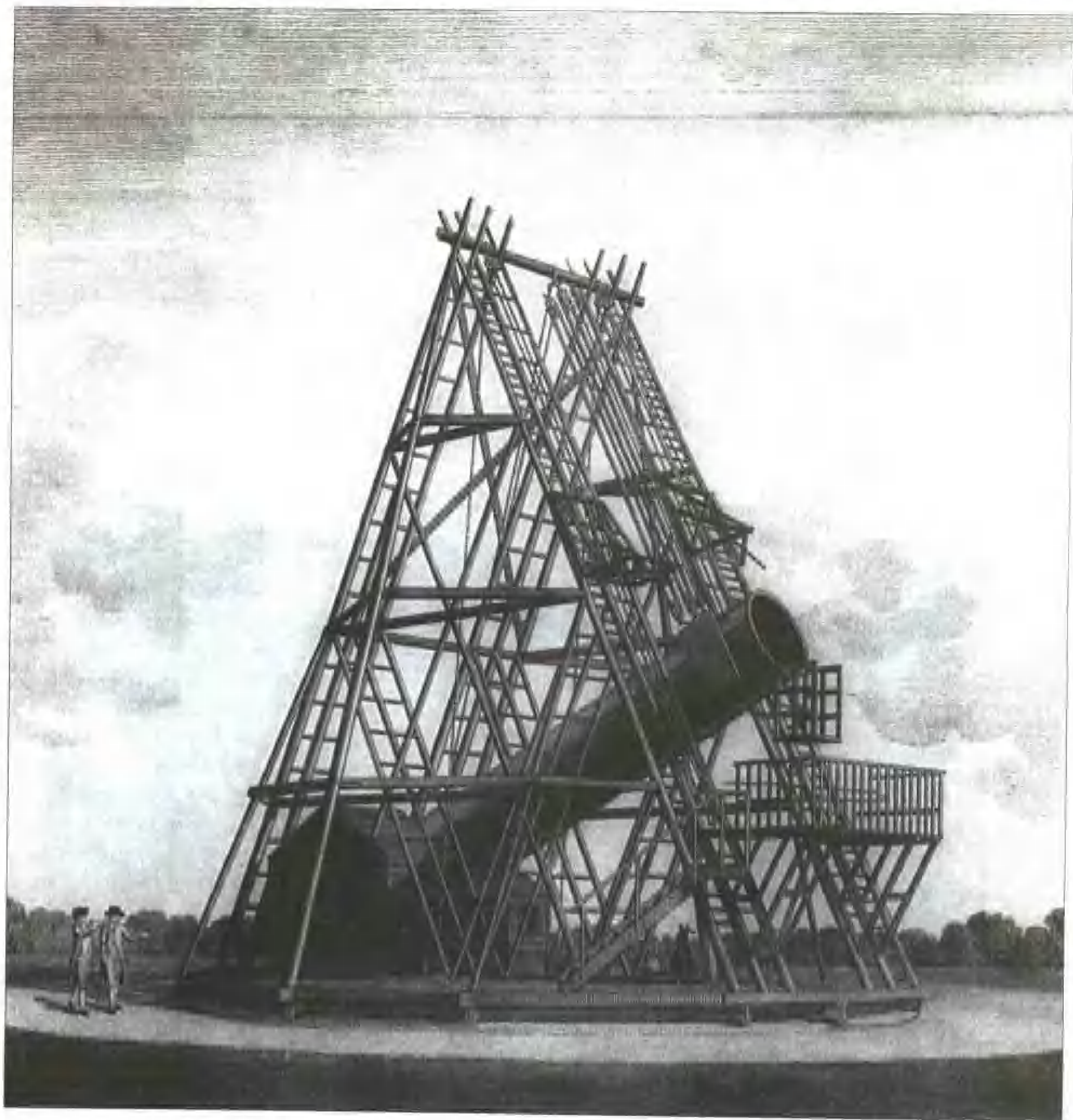
层所表现出来的光学效应。但是，这个星层的精确形状是什么样的呢？显然，赫歇尔无法对此做出解释，除非他的望远镜使他能看到银河系在各个方向上的极限。那么，该如何解决这一问题呢？赫歇尔找到的解决办法是假定在整个银河系中恒星的分布是均匀的——银河系空间被恒星均匀地占据着。显然，这样的假设在字面意义上是不真实的，但赫歇尔希望在他所提及的意义上该假设是真实的。

赫歇尔的观测支持了上述假设。他在给定的方向上发现的恒星的数目与落在其视场中的银河系的空间体积成正比，也就是说，与空间的一个锥形体积成正比，该锥体的锥顶在望远镜处，而其轴线则是从观测者发出的直达银河系边界的视线。赫歇尔接下去准备对恒星加以计数，以获得与锥体体积成正比的恒星的数目，然后再通过一个简单的计算，就能得到轴线的（相对）长度。但是时间不允许他做完所有这些工作。不过为了说明他的方法，他清点了天空中一个圆形区域内的恒星的个数，对银河系的这个横断面做了描述。

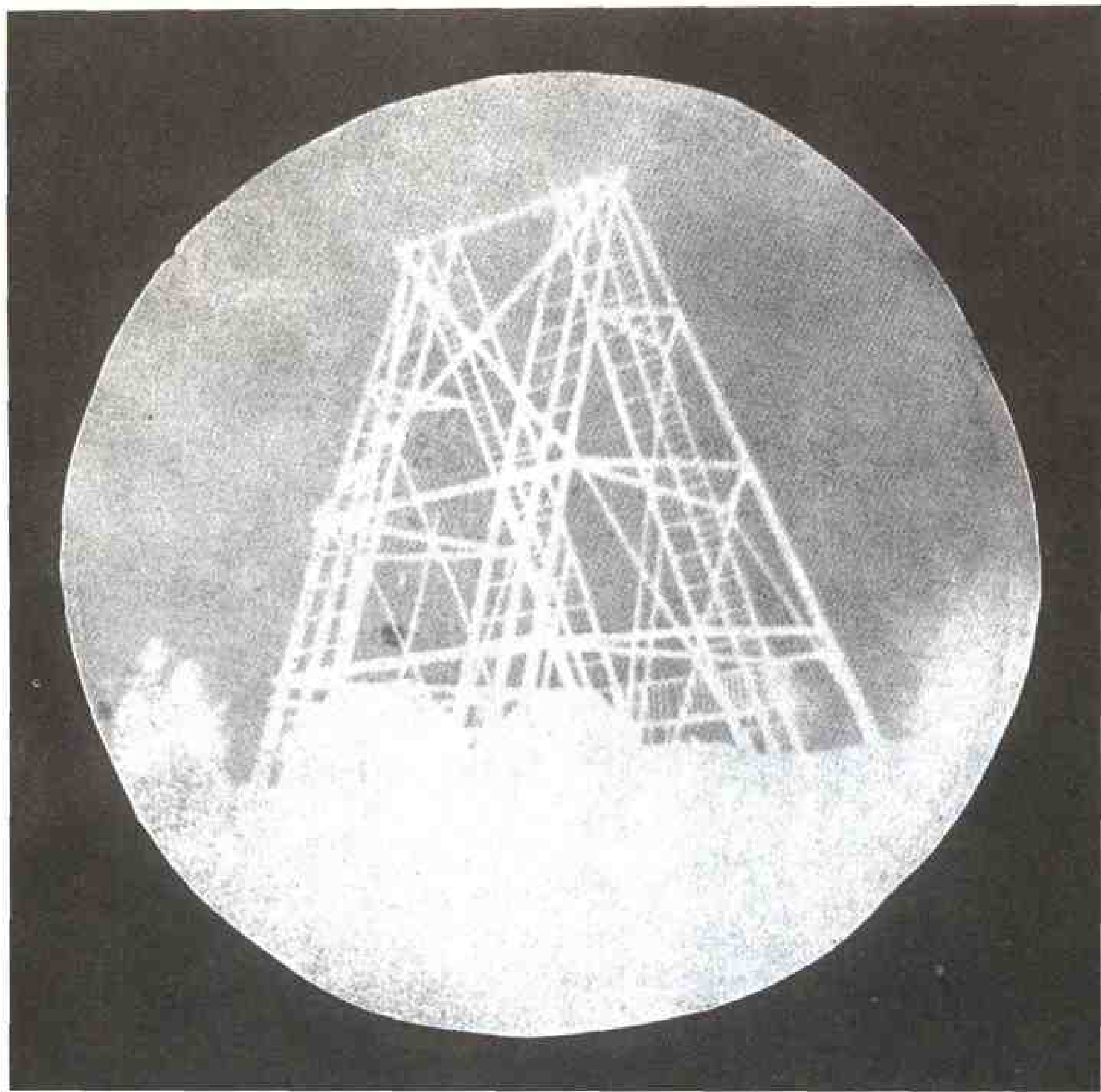
在后来的岁月中，他准备放弃他这位知名人物赖以立身的这两个假设：他发现他1789年建造的那架新的、庞大无比的40英尺长的反射式望远镜使他在同样的视场里能够看见更多的星，这样他的那架20英尺长的望远镜显然原来没有看到各个方向的尽头；另外，随着对恒星星团熟悉程度的增加，他也深刻认识到了恒星分布的不均匀性。但是天文学家与“大自然”一样，是厌恶真空的，赫歇尔的横断面本来是可以不被他的后继者所承认的，但很长一段时间内，没有取代它的东西，因此我们可以看到，直到19世纪，它还在被重印。

话走得太远了。

1790年11月，赫歇尔像通常一样在搜寻星云，这时他碰到了“一种最奇特的现象！一颗亮度大约为8等的星和一片模糊的发光气团。”他最初碰到他的“行星



状星云”是在1782年，那是一颗有着盘状轮廓的行星，因为天空昏暗看上去就像星云。从那之后他又发现了好几团这样的星云。他现在碰见的实际上是另一类，但这次他看见的这团星云外观不同寻常的大，他能够看出它的结构，特别是它的中心恒星。他认为，这颗天体一定是一颗“星云状星”：一颗被真正的星云环绕着的星，由这些星云衍生的星正处于聚缩过程之中。就这样，一旦面对这一新的证据，



一架历史性仪器的历史性照片。约翰·赫歇尔1839年9月所摄、照片上表现的是那架40英尺望远镜的风烛残年状态，其望筒已经最后一次被降了下来，其整体结构将于这年的冬天拆掉。在1839年或1840年的除夕，约翰·赫歇尔把他的全家召集到了这个斜倚着的望筒旁，朗诵了一首与之告别的诗篇，然后动手把他父亲的磨镜工具和望筒一道封了起来。约翰·赫歇尔是摄影术的先驱，他还把摄影术(photography)这一术语引入了英语。

赫歇尔立即从他1784年就持有的立场上倒退，不再坚持所有的星云都只不过是位于远距离处的星团而已的说法。无论如何，星云状物是存在的，它代表了天体演化过程中的前恒星阶段。

这样，赫歇尔关于宇宙演化的最后的理论认为：最初是处于弥散状的星云，这种星云在引力的作用下在不同的地方凝聚成更为浓缩的星云，浓缩的星云开始形成一个个的恒星，而这些恒星又会向一块儿聚集，形成分布得广泛而又松散的星团，这种星团又进一步聚集起来。星团的剧烈聚集导致其崩溃，这种崩溃以及从所有发光体向宇宙发出的光，又为形成新的弥散状星云提供了物质。这样，新一轮的循环又重新开始。

1790年的观测发现，我们所处的银河系的状况也发生了变化。在18世纪80年代中期，赫歇尔认为银河系是已为人们所知的恒星系，其范围是有限的，而所有的星云都是类似的星系，尽管它们的形状和大小各有不同。因此，当他看到猎户座星云横越太空，尽管人们假定该星云距离遥远，以至于我们探测不到其中单个的星，他仍然认为该星云的规模一定是巨大的：确实，它“也许比我们的银河系还要大。”但在他的1790年之后的理论中，猎户座星云就又重新成了位于银河

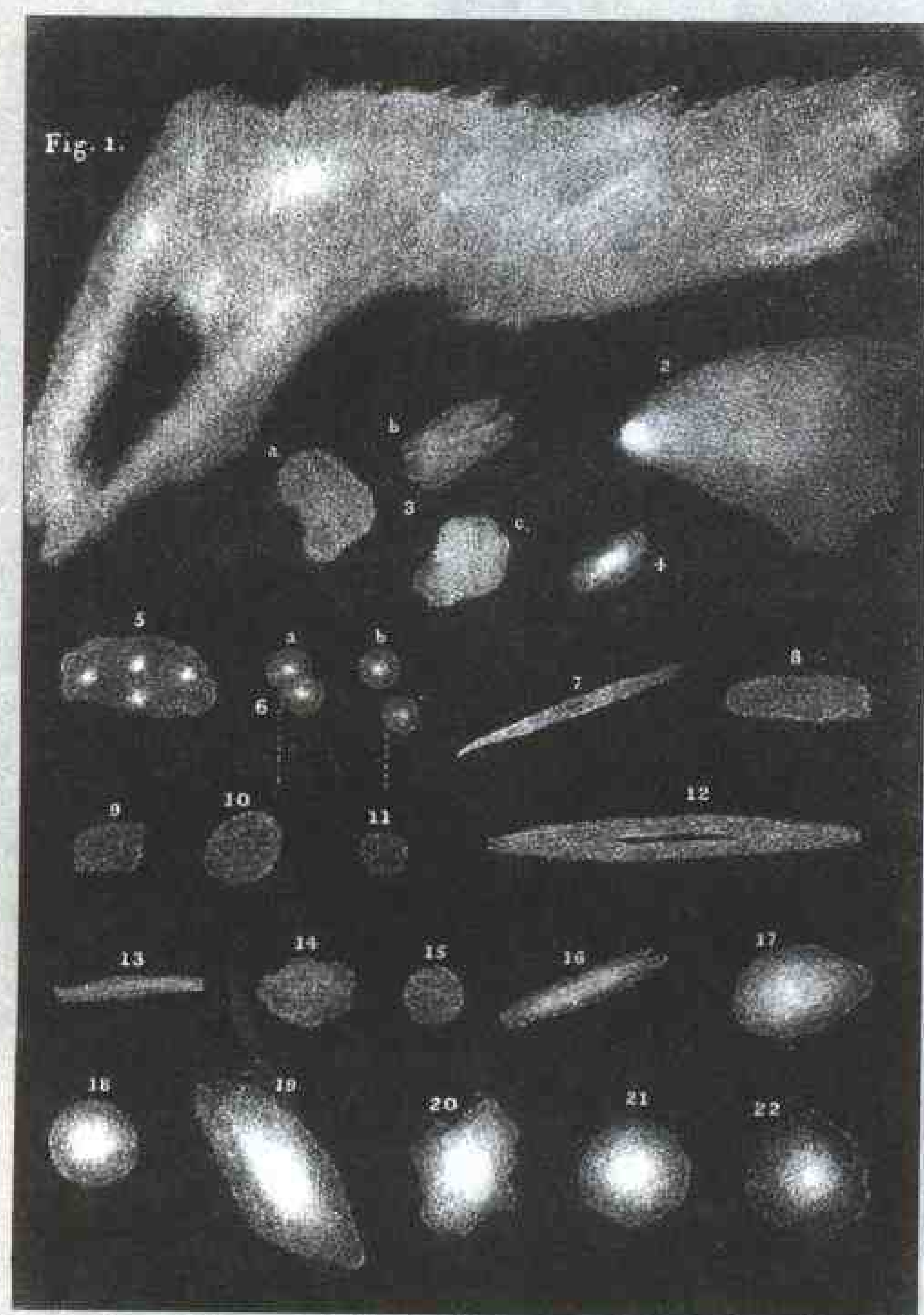
左页图：赫歇尔的40英尺反射望远镜，是其20英尺反射望远镜的放大版，一个庞然大物。1789年制成，直到1845年才有了比它更大的望远镜。它的第二面反射镜重量将近1吨。为了防止因其自重作用而产生的变形，赫歇尔在镜体中增加了铜的含量。结果这面镜子的光泽消失得很快。

赫歇尔1790年11月看到的星云星团新总表中的第1514号行星状星云。他在早些时间发现并命名的更遥远的行星状星云的性质是不清楚的，但这次发现的这颗则清楚地显示出它是由中心恒星及围绕在它周围的发光气团组成的。



系内我们附近的星云，而银河系则变成了“最明亮的、其他星系与之无法比拟的最广阔的恒星系”。

1811年，赫歇尔写道：“关于天体结构的知识总是我观测的最终目标……”赫歇尔有可能把这变成一门真正的科学，因为他把实现这一目标所必不可少的三种天资融合到了独一无二的地步：既是仪器制造家，又是观测家，还是理论家。他建造了对于他设定的目标而言是十分理想的仪器：由大型反射镜、放大倍数达到几百的目镜和稳定的支架所组成的这些仪器，均出自他的手中或是在他的直接监控下完成的。利用这些仪器，他成功地扮演了天空的自然史家的角色，在延续多年的观测之战中，搜寻到了成百的



星和星系的生命经历

赫歇尔画的用来说明他的星云和星团表中的天体的草图。左图的排列顺序意在展示星云凝缩成恒星的过程，而右图则表示恒星间的作用如何进一步导致形成凝聚的星团。

1811年，赫歇尔指出，尽管天文学家本身的生命跨度有限，但他们仍然能够成功地了解由引力作用所导致的星云变化。为此，他们必须选择处于不同的演化阶段的星云样本，然后将其按年龄进行分类和排序（左图）：“在相邻的两个之间也许没有多大差别（在分类排列时相邻的星云），但如果我可以做个比喻的话，这就像如果我们对一个人进行年度记述的话，它就能给出这个人从刚出生的婴儿到其盛年的成长过程一样”。

1814年，赫歇尔发表了一篇次要些的文章。在这篇文章中，赫歇尔越过了恒星四散分布的阶段，继续描述这种演化传奇。一组四散分布的恒星在其相互引力的作用下，会不停地向一起聚拢，直到形成一个密集的星团为止。

他的儿子约翰常常受到怀疑论和子女应有的孝心二者的撕扯，这使他在是否提出与其已故父亲的理论相矛盾的见解方面犹豫不决。1826年，怀疑论的思想占了上风。约翰问道，人们如何能够从星云和星团的“观测到的等级”中，“认

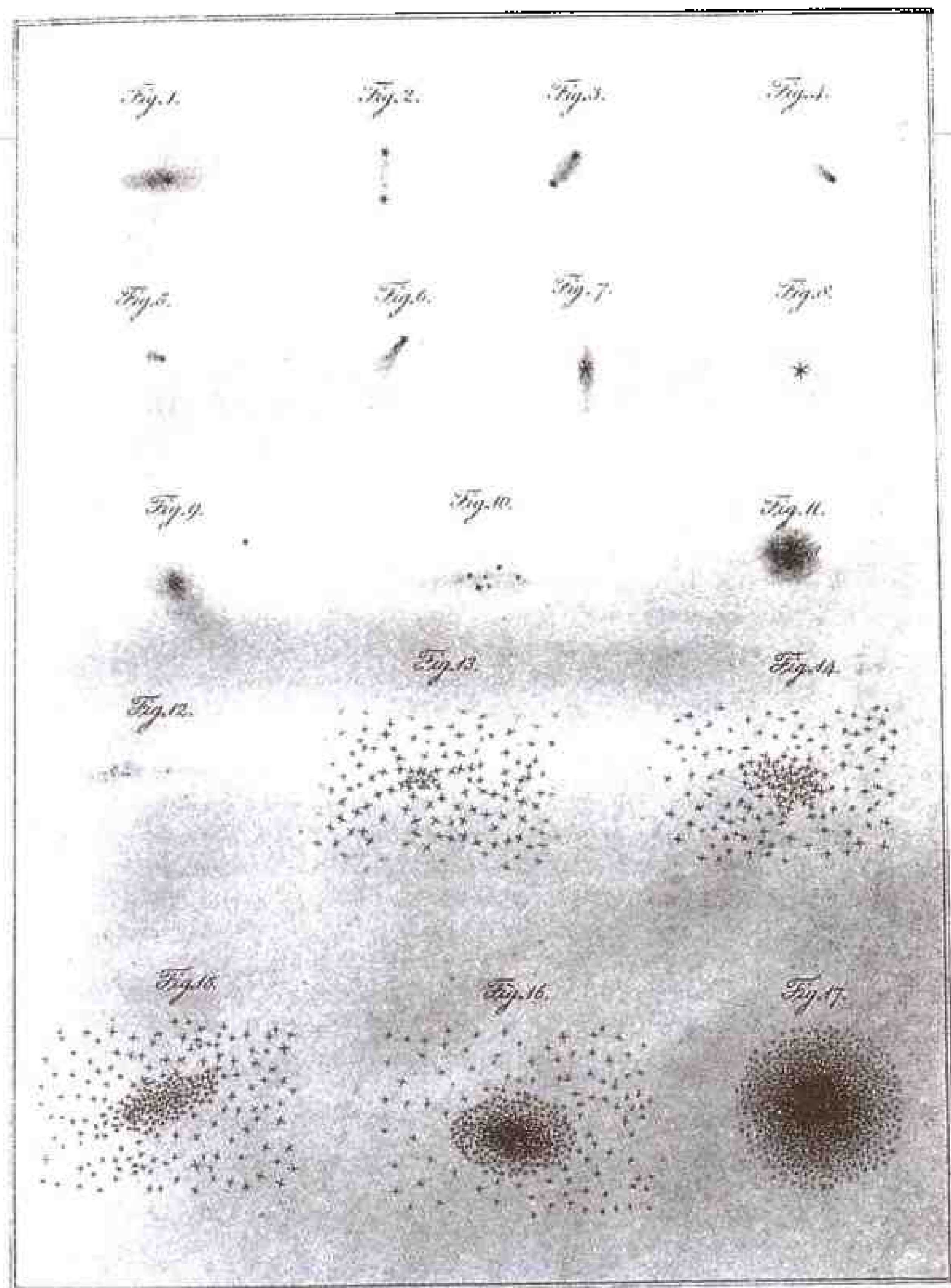
双星、成千的星云。而且，作为一个如此不同寻常地献身于搜集观测事实的学者，他把进行广泛深入的思考而不是浅尝辄止视为自己理所当然的职责。

在他的同时代人中，赫歇尔的影响是混合的。特别是在关于星云方面，这是他的个人领域：没有人拥有可与他的望远镜相媲美的仪器，这样也就没有人能够使用这些观测证据。因此，也就很少有人知道该如何去理解他和他的思索。但是他在皇家学会《哲学会报》上的文章却是下一代天文学家们很容易得到的，他们对于他的思想更能领悟。这些人中的佼佼者是他的儿子约翰·赫歇尔。

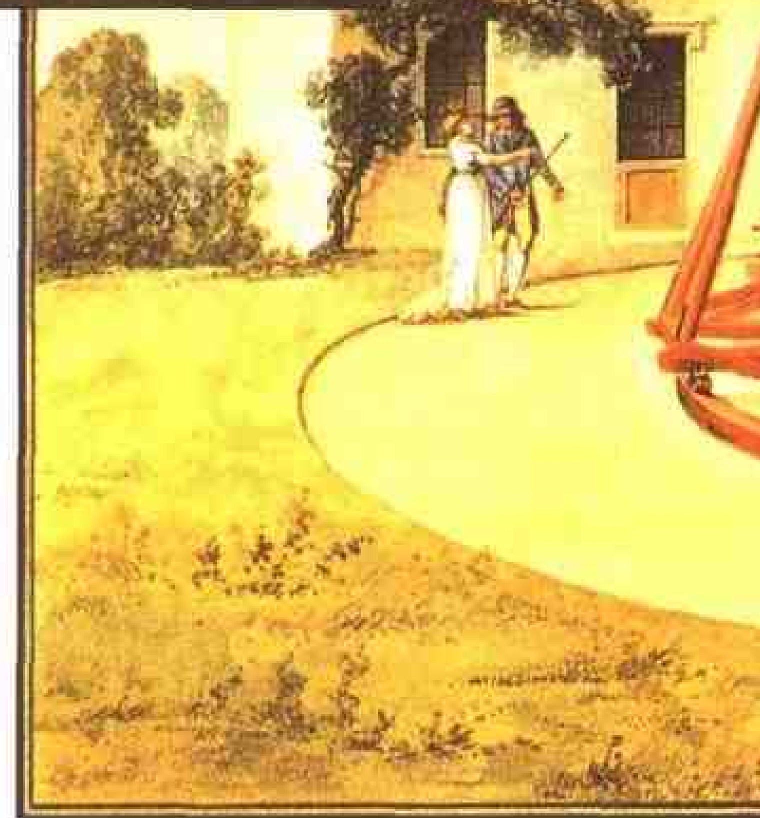
约翰·赫歇尔和南天星空观测

威廉·赫歇尔在开始他的天文学生涯的时候，是一个出生于德国的粗俗的乐手。他 53 岁那年才有了独生子约翰（1792 － 1871 年）。约翰在天文学方面继承了赫歇尔这个响当当的名字，

定它们处于从演化系列的一个状态到另一个状态的变化过程中呢”？他得出结论说，“可供我们猜想的范围是如此之大……我们现在会求助于观测，尽力排除假说（也许得等到未来的几个世纪）。”甚至“真星云”的存在本身也继续是一个讨论的对象。不过，约翰最后确实采纳了“恒星聚集理论”，根据这一理论，星系在最终达到稳定结构之前，确实要经历一个塌陷和混乱的时期。




1848年的马德里天文台。



西班牙国立天文台

众多的天文台都是18和19世纪建立起来的，其中大部分是国立的，大学的、大主教会的、贵族的、或者是业余爱好者满腔热情的产物。马德里天文台（上图）是西班牙国王1790年建造的一座国立天文台。它一开始就配备了进行位置测量所需要的中星仪和时钟，但到了1796年，威廉·赫歇尔又受托为其制作了两架反射式望远镜。一架应该是按标准设计的小型携带式望远镜（实际上，天文台得到的是两架7英尺长的望远镜，它们的反射镜的直径有稍微差别），而另一架则在他曾经售出的望远镜中应是最大的：镜面直径2英尺，焦距达25英尺。右图是赫歇尔与装配说明一道送去的水彩画。这架望远镜在他所制作的望远镜中也许是最成功的：它比他通常使用的20英尺望远镜放大倍数更大，而比他那架40英尺的庞然大物则要轻便些。这架望远镜是1802年用船运到西班牙的，1804年在马德里被竖了起来，然而其支架却注定要于1808年被拿破仑的军队所毁坏。





约翰·赫歇尔

约翰·弗里德里希·威廉·赫歇尔于1792年3月7日出生于温莎城堡附近的斯劳，是威廉·赫歇尔的独生子。他1809年进入剑桥的圣约翰学院学习，在那里他是英国数学改革活动的领袖人物，他年仅21岁就被选进皇家学会，1820年，在筹建未来的皇家天文学会的过程中，他又获得领导地位。在当时，他也许是英国最杰出的科学家，他于1831年被授予爵位，1838年被册封为从男爵。他非常有名，以至于国外寄给他的信只要在地址上注明“伦敦”，就能寄到他的手上。

在对他父亲在斯劳观测天空所得资料做了进一步的完善之后，赫歇尔从1834年到1838年在好望角对南天星空做了观测。从好望角回来之后，他很大程度上放弃了观测天文学的工作，但即使如此，他仍然于1864年出版了一部包含了五千多个星云和星团的总表。他做的这个总表是现在天文学家所用的《星云星团新总表》(NGC) 的先驱。

赫歇尔拥有很多的私人财产，但他的财产的来源却是一个谜。同样令人感到困惑的是，他于1850年接受了造币厂厂长的职务，他在这一位置上的五年并不愉快。他于1871年在家乡肯特去世，去世后被安葬在威斯敏斯特教堂。

当他还是剑桥的一名大学生时，他就成了一个科学团体的成员。在短暂地从事法律之后，他安定下来，在剑桥开始了教书生涯。但到了1816年，他那年迈的父亲要求他回家，以便把自己制作望远镜和进行天文观测的本领传授给他，免得后继无人。约翰在离开剑桥时写道：“我的心已经死亡。”但一旦他投入了父亲的事业，他这当儿子的却看到自己被赋予了神圣的使命：完成他父亲的工作，使其更加完善。

对于约翰来说，双星显然是他在这个领域开始探索的最合适的起步之处：他父亲的望远镜是强有力的天文发现武器，而对双星的高精度的观测又是在所有观测中做得最好的。他还有幸运之处：他在科学界的朋友中，有一位叫詹姆斯·索斯（1785－1867年）的。索斯由于婚姻而拥有了大量财富，这使他可以为了天文学而放弃他的诊所。索斯是位优秀的观测家，还拥有两架性能格外优良的赤道仪。从1821年到1823年，这两位朋友在一起合作，他们常常用不同的仪器观测同一天体，然后相互比较自己的记录。他们的努力导致了一个包含380颗双星的星表的诞生，该星表资料细致，编排顺序合理，观测者使用起来非常方便。

但是，他父亲的主要遗产却是其对“天体结构”的研究，以及作为这些研究基础的星云星团表。这些表是按天体的分类而不是其在天空的位置排列次序的，

因此别的观测者在使用它们时感到极不方便。此外，当卡罗琳在记录下她哥哥观测时的口述时，随着各种各样的星云进入她哥哥的视野，她的记录完全有可能出错。幸运的是，约翰在他父亲的指导下，重新抛光了他父亲的那架20英尺反射式望远镜，这样他就有了理想的仪器，可以对他父亲的星云进行再度观测（和重新

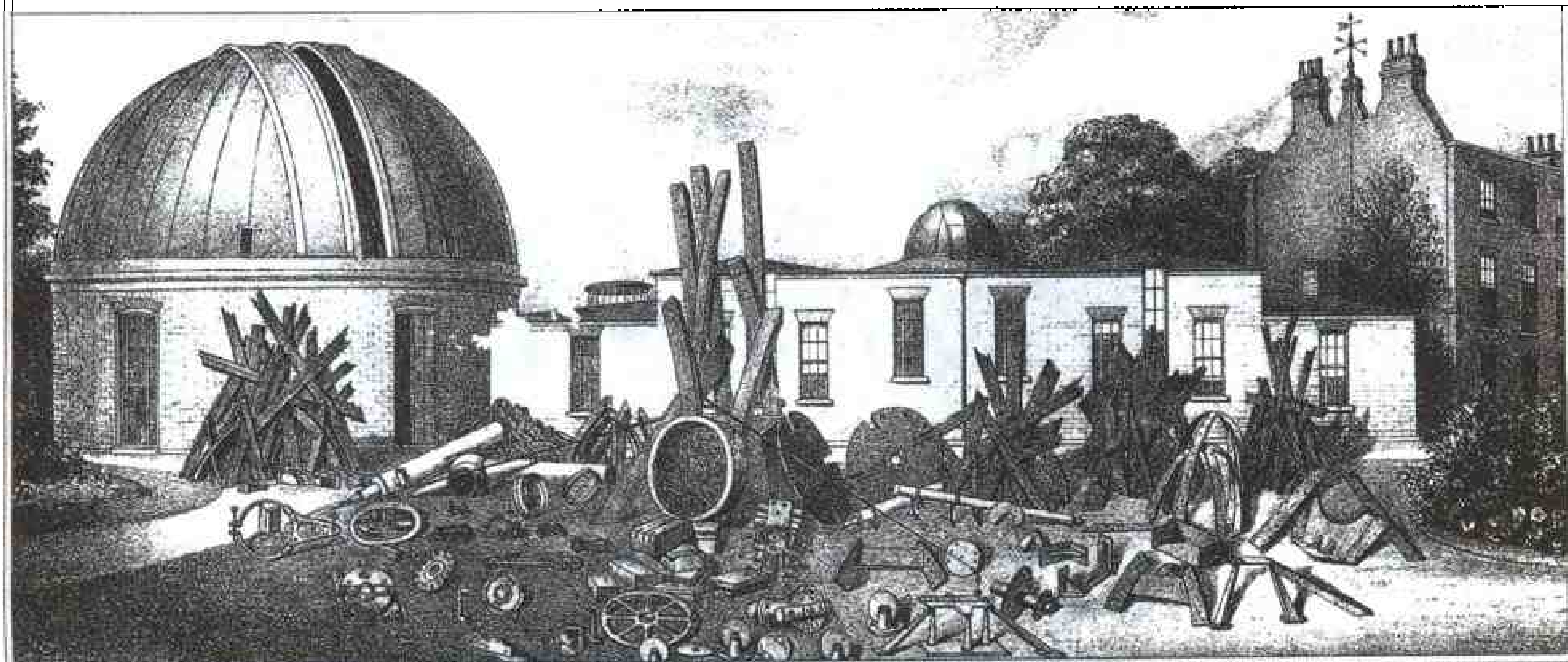
代价高昂的索斯物镜

在19世纪早期，观测者在获得大口径、高质量的物镜方面，存在着激烈的竞争，因为这样的物镜太难制造成功了。谁的折射式望远镜装备了这样的物镜，谁就比他的竞争对手有了明显的优势。

大约1830年左右，巴黎的制造商科西克斯（Robert A.Cauchoix，1776—1845年）制造了3面这样的透镜，它们的口径都在11.75到14英寸之间。这3面透镜中诺森伯兰郡的公爵（Duke Northumberland）为剑桥天文台买了一面——诺森伯兰望远镜是曾被詹姆斯·查理斯（James Challis）所使用的仪器，但查理斯在用它搜寻海王星时却无功而返（见本书第183页）。另一面被爱德华J. 库珀（Edward J. Cooper）所得到。库珀是为他在爱尔兰西北的马克利城堡的庄园里的天文台而购买这面镜子的。而第三面则由詹姆斯·索斯（James South）为其位于伦敦的坎登山的私人天文台购得。

索斯在双星观测方面是当时的领袖人物，惟一能对其地位构成挑战的是威廉姆·斯特鲁维（Wilhelm Struve），他在多帕特有一架供自己支配的折射式望远镜（见本书第205页）。1829年，索斯听说法国天文学家们正在与科西克斯就这面透镜的价格讨价还价，于是他立即赶到巴黎，按科西克斯的开价付了钱，然后带着这面透镜凯旋而归。然后他委托伦敦头号制造商特劳顿—西姆斯公司的爱德华·特劳顿（Edward Troughton，1753—1835年）为他制作支架，没有支架该透镜将毫无用处。索斯希望这个支架以他的那架5英尺赤道仪的支架为参照，按比例放大，但特劳顿则另有所思。

事情很快变得糟糕起来。索斯容易冲动发怒，在这方面他声名狼藉，不久他就宣称他对特劳顿提供的支架不满意，拒绝为其付款。特劳顿—西姆斯公司将他告上法庭，从1834年到1838年，在经历了昂贵的诉讼之后，他们得到了他们想要的结果，在此期间，特劳顿没有看到最终结果就去世了。索斯暴怒之下精神失常，在几个月的时间里，他把望远镜的极轴砸成了碎片，拍卖了这些碎片（本页图中地上所摆之物）。三年后，他通过张贴报复性海报的方式做广告，拍卖了其中的黄铜构件。但是，他保存了那面透镜。在他的生命快走到头的时候，他将其赠给了都柏林大学。但此时它已经过时了。索斯自己的观测生涯也被毁了。





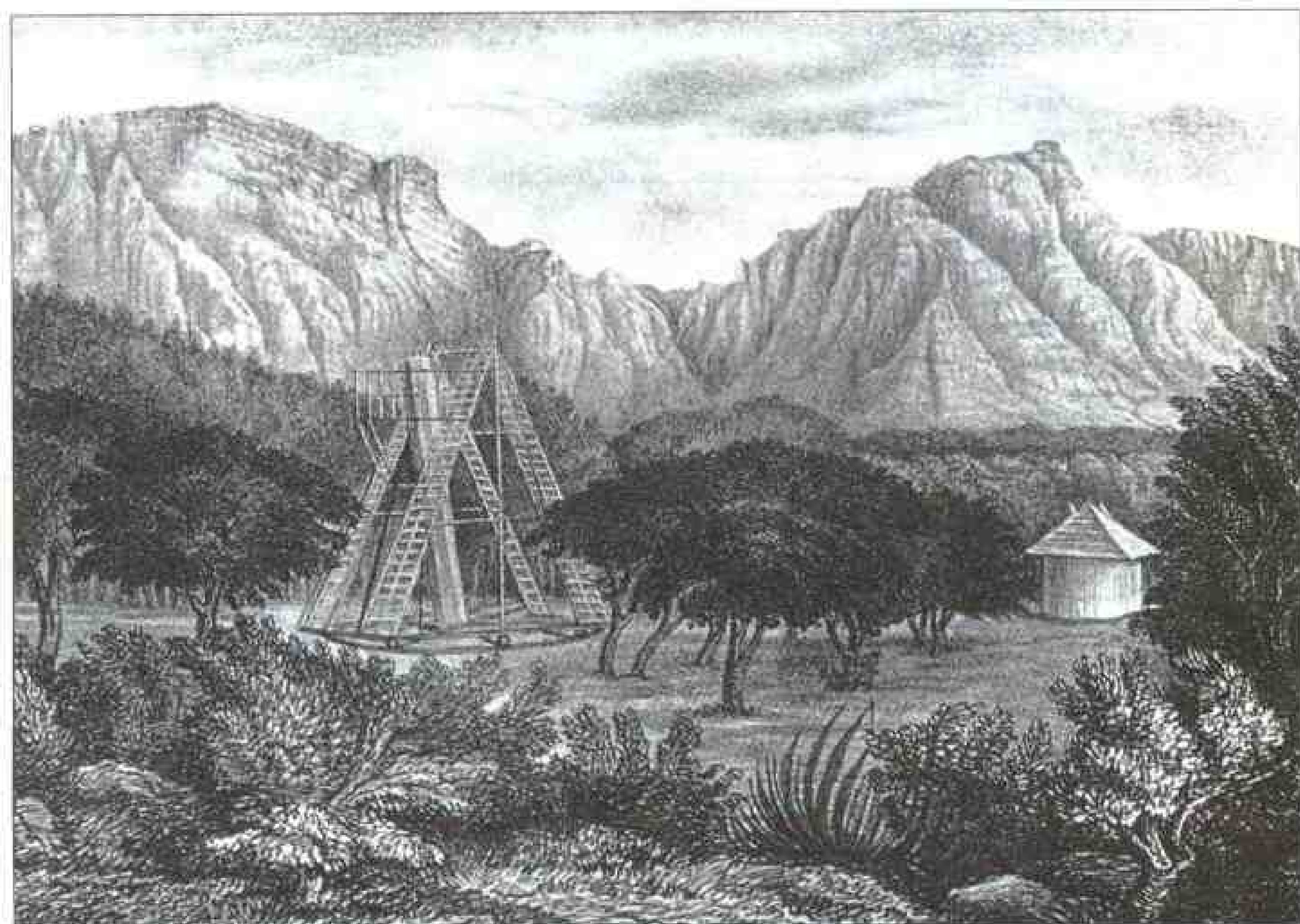
约翰·赫歇尔1828年所绘的M51星云图。位于星团中心的观察者将会看到亮星环绕天空四散分布，还会看到一个昏暗的、分成两叉的"银河系"——与我们自己所看到的非常相似。

排序)。他在1825年对卡罗琳说，"我现在要负起自己特殊的责任，因为除了我，没有人能看到这些奇特的天体。"他即刻投入工作，他努力的结果使得一个包含有2306颗星云和星团的天象表诞生，该星云星团表刊登于1833年的皇家学会《哲学会报》上，它成了这个领域的标准参考书，使星云研究从独行其是的威廉的天马行空的工作变成了天文学主流的一部分。

迄当时为止，约翰·赫歇尔对于星云的感受与他父亲没有多大差别：他们面对同样的天空，使用同样的仪器。因此，他们持有同样的理论立场也就不令人惊奇了。只有一项意义重大的新证据是他以自己的方式发现的：他曾经好几次清晰地看到了M51星云，他看到该星云是由星星组成的，这些星星形成一个中心星团，星团被一个分叉的环所环绕。面对这种情形，他立刻意识到，位于中心星团处的观测者所看到的天空与我们从地球所见的天空惊人地相似：沿各个方向都有一定量的近星（因此也是亮星）分布，在环内靠近环平面的地方，则是一个由无数昏暗的星星组成的分叉的乳状星云。约翰评价说，"它也许是我们的兄弟星系。"

约翰的父亲仅仅看到了从英国所能看到的天空，为了完成父亲的事业，约翰·赫歇尔需要把他的望远镜竖立在赤道南侧。他谢绝了官方提供的经费支持，在1833年扬帆出海，驶向好望角。为了探索更远处的天空，他有自己的20英尺望远镜；为了进行精确测量，他从索斯那里买来了赤道仪；为了进行初步的搜寻，他有他父亲为卡罗琳制作的最大的"彗星搜寻器"（见第220页）。

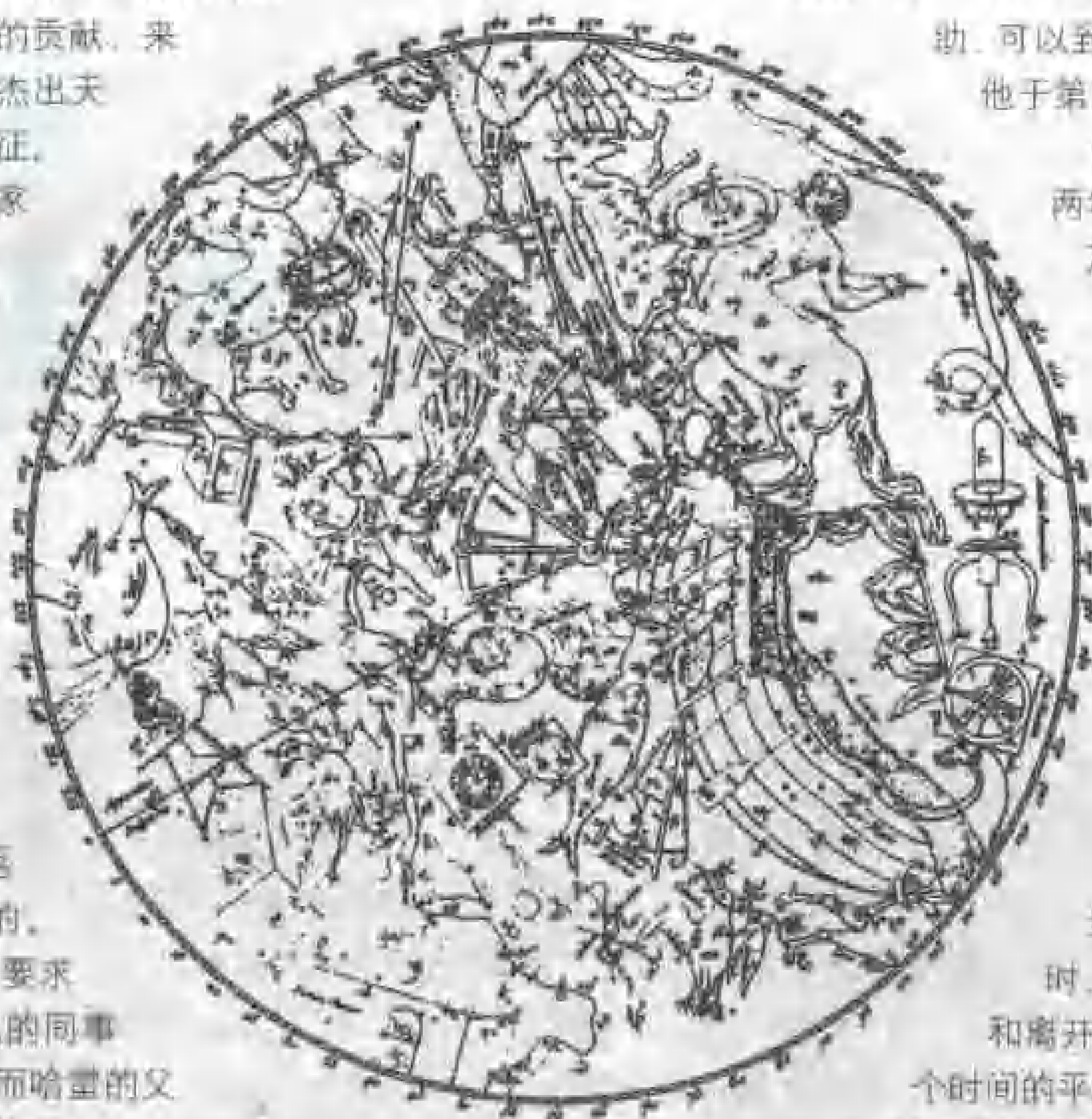
在接下来的4年时间里，在没有卡罗琳帮助的情况下，约翰对南天观测星空做了探测，他的献身精神甚至超过了他父亲。根据这次观测的结果，他写成了那本名为《1834—1838年间好望角天文观测结果》(Result of Astronomical Observations Made During the Years 1834,5,6,7,8 at the Cape of Good Hope)的书，



重新抛光了的20英尺反射式望远镜，设在约翰·赫歇尔的距开普敦几英里的费尔霍森临时天文台上。由于海风的吹拂，该望远镜的反射镜过几天就会失去光泽，需要重新打磨，这时它就无法工作。约翰预见到了这种情况，他带来了3面备用的镜子，其中一面是威廉制作的，另一面是他自己制作的，还有一面是他们两个合作制作的。

早期的南天观察

南半球星空比北半球能够向观测者提供更多的东西，因为它包含了位于银河系方向上的银河系亮星团，以及像麦哲伦星云那样的奇迹。然而，由于天文学是在欧洲发展起来的，而且在过去的世纪里向赤道之南的旅行非常困难，只有到了我们的这个时代，南天观测星空才在吸引人们的注意力方面分享到了它应有的份额。在皇家天文学家斐然·法罗斯（Fearon Fallows，1789—1831年）于1821年到达好望角之前，那里从来没有过公共天文台。直到那个时候为止，关于南天观测星空的知识都来自海员们的贡献，来自哈雷和拉卡伊这两位杰出天文学家的向南半球的远征。



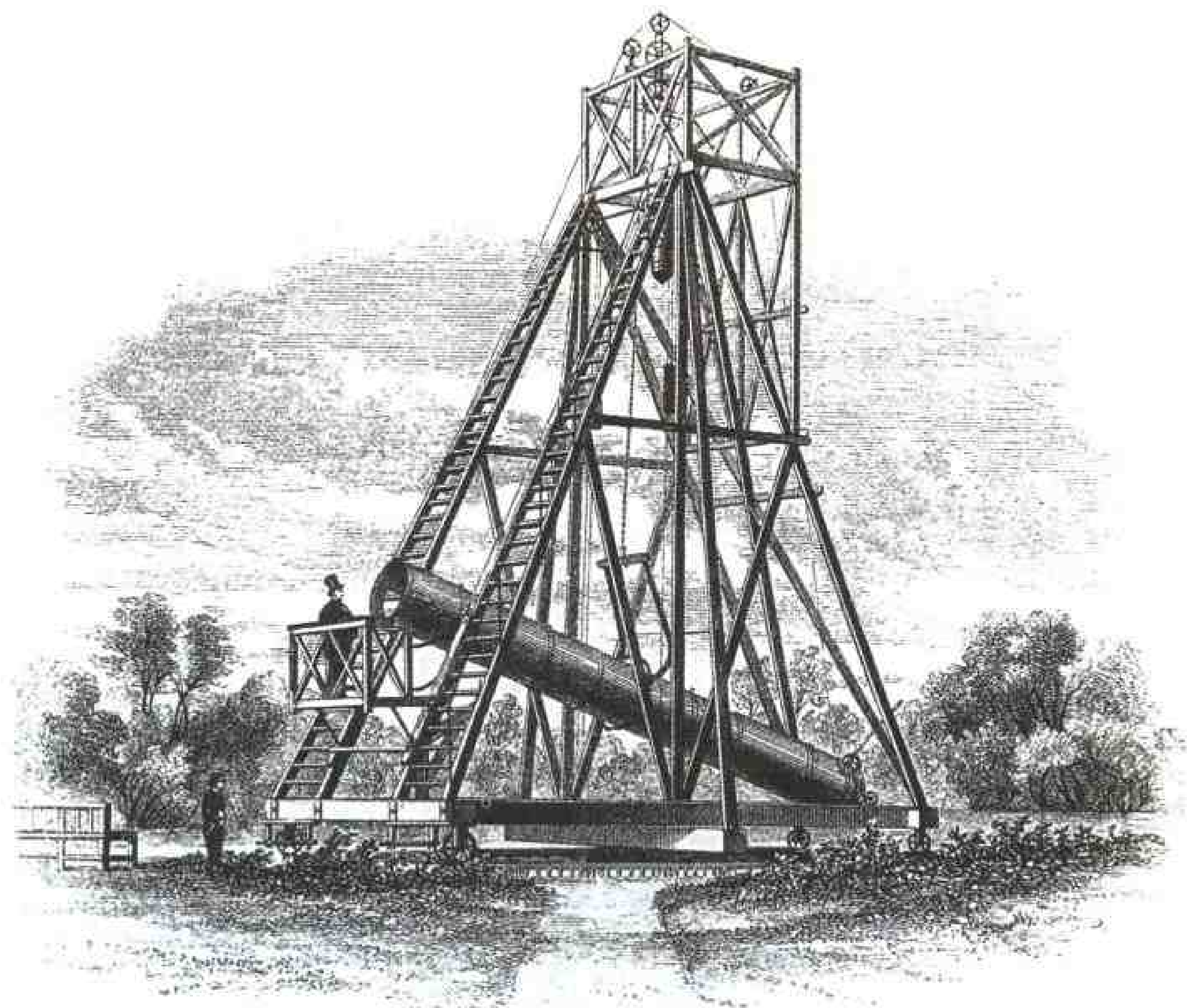
爱德蒙·哈雷在皇家学会范围内获得声誉时还很年轻，早在1676年，他还不到20岁，就为到赤道之南的合适地点进行观测与有关方面进行接触，但这些地点中有一些掌握在外国人的手中，因此他的选择最终只能落在南太平洋的圣赫勒拿岛，该岛是被英国东印度公司作为往返途中的一个小站来用的。国王在人们的劝说下，要求东印度公司给哈雷和他的同事们以自由通行的权利，而哈雷的父亲则答应负担整个探险的费用。

1677年2月，哈雷到达该岛，在那里停留了大约一年。他随身携带了一套仪器，其中最重要的一件是装有望远镜的半径为5.5英尺的六分仪，可以用来测量两个一对的双星之间的角距离。当地的天气比哈雷原先估计的要糟糕，但哈雷还是设法编制了一个有350颗星的星表，列出了它们相对于第谷·布拉赫的两个基准星的位置。

他还观测到了三个"星云"，其中包括被称为M7的散射星团和半人马座ω球形星团。他写道："麦哲伦星云精确地再现了银河系的白色，当用望远镜观测时，它们在这里或那里呈现为小型的云团和一些星星，在其汇合处，白色将会形成，如同银河系的情况一样。"10月28日，他观测到了水星从太阳的圆面上经过的情形（凌日）。

南天星空的再次被仔细观察，则要等到下个世纪的中叶。1750年，作为天文观测者享有令人敬畏的声誉的神父尼古拉斯-路易·德·拉卡伊（Nicolas-Louis de Lacaille，1713—1762年）获得了政府的资助，可以到南半球进行天文考察。他于第二年春天到了好望角。他在好望角停留了不到两年的时间，测量了近一万颗恒星的位置。他通过把具有大光圈的小型望远镜装配到一架墙象限仪（安装在一堵南北墙上的带刻度的四分之一圆弧），以及在仪器的视场安装上菱形光圈而获得了这样非凡的成绩。望远镜固定在子午线上一个特定的仰角上，当恒星从视场中飘过时，拉卡伊就记下它进入和离开菱形光圈的时间，这两个时间的平均值给出这颗恒星的一个坐标，而其差值则给出另一个坐标。他还汇集了不少于52颗星云目标的资料，为南天观测星空中的星座起了名字，这些名字中的大部分至今还在使用（见上述他的1752年星表）。

1757年，拉卡伊公布了南天观测近四百颗最亮的恒星，以此建立了南天观测天文学的框架。他对南天观测的10,000颗恒星的观测结果是在他去世之后，于1763年公之于世的。无论如何，他留下了他的恒星位置测量工作中的大多数原始资料，直到1847年，关于他的南天观测恒星的权威性星表才得以出版。



装有3英尺反射镜的望远镜。该望远镜由未来的贵族罗斯建造于1839年。罗斯采用的是威廉·赫歇尔发展了的那种形式的支架。第一面镜子是用16块圆弧装配起来的，但到了1840年，罗斯在当地劳工的帮助下，成功地整体铸造了一面坚固的镜子。罗斯相信望远镜能把一批星云"分解"成组成它们的恒星，望远镜越大，它能分解的就越多。

不过该书的面世却很晚，一直到1847年才出版。可以证明该书是整个观测天文学史上最大的单独出版物，它有一个自负得令人生厌的副标题："用望远镜完成了对整个可见星空的观测，始于1825年。"因为约翰·赫歇尔已经是而且也将继续是历史上用大型望远镜对整个星空进行系统观测的惟一的天文学家，所以才起了这样一个副标题。该书列出了1700多颗星云和星团，还有2100多颗双星，以及数千的恒星、大量的恒星相对亮度序列和别的许多内容。

1838年3月，他在尽了对父亲念念不忘的职责之后，乘船返回英国。他未来在天文学方面的工作将坐在书桌旁完成。无论如何，在一两年之内，赫歇尔对大型反射式望远镜的垄断地位终结了。在这期间，正如威廉姆·斯特鲁维所指出的那样，对天空星云的研究看上去"几乎是赫歇尔家族独享的领域"。

帕森城的利维坦①

1839年，未来的第三代罗斯勋爵（Earl of Rosse）威廉·帕森斯（William Parsons，1800—1867年）在中爱尔兰的帕森城（现在的Birr城）他的城堡的地面上建造了一架大型反射式望远镜。尽管它是按照赫歇尔的20英尺望远镜的模式装配起来的，但它的3英尺口径的反射镜在直径方面是赫歇尔那架的两倍，在面积

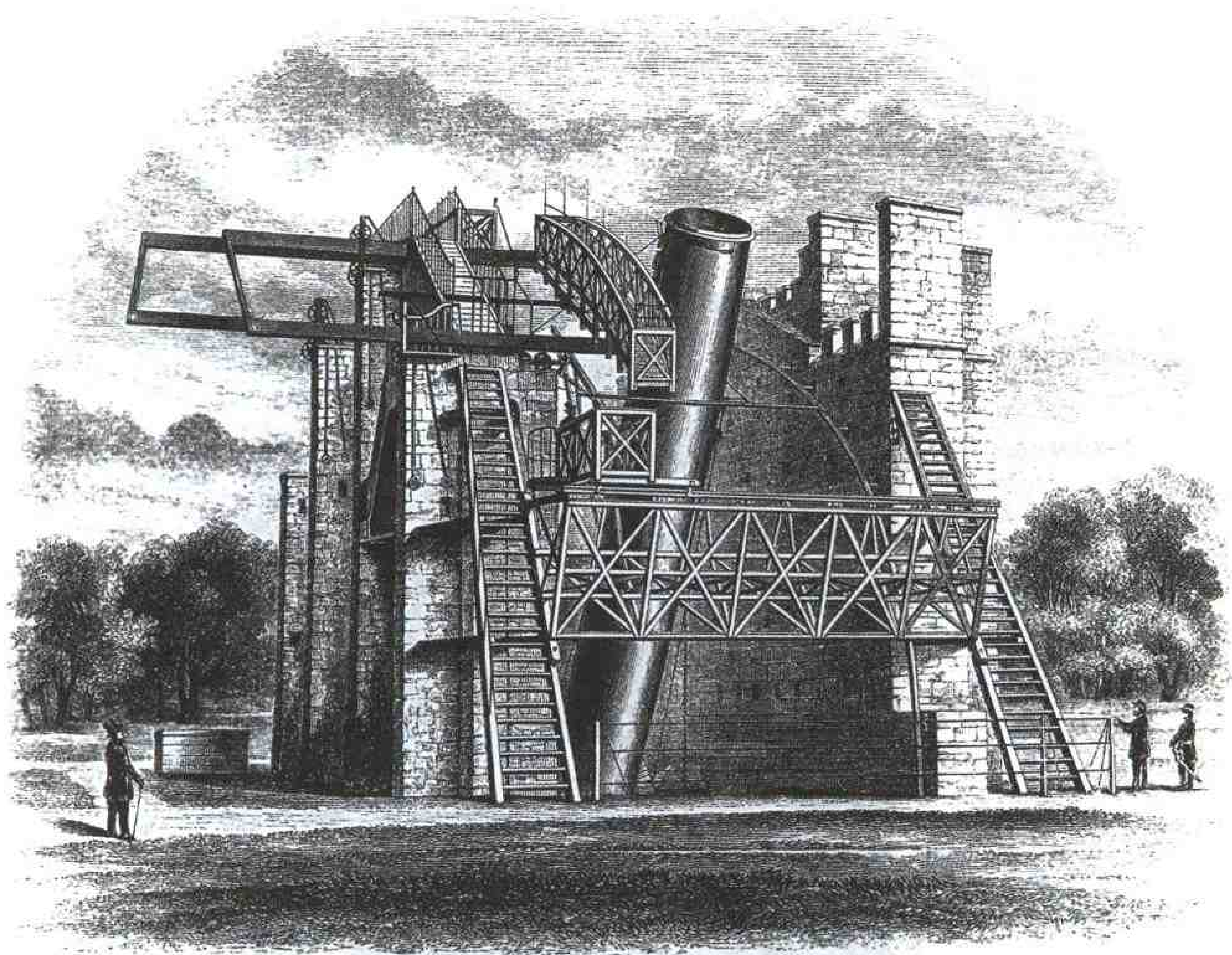
① 利维坦，原词为Leviathan，意为海中巨兽，西人常以此词代指庞然大物，类似中文中"巨无霸"之意。英国著名思想家霍布斯（Thomas Hobbes，1588—1679年）之名著《利维坦》（Leviathan，1651）即取意于此。此处代指罗斯勋爵建造的那架巨型望远镜。——译者注

方面则是其4倍。这架仪器刚一装好，罗斯勋爵就开始了对另一架庞然大物的制作，它的反射镜直径达到了不可思议的6英尺之大，过去从未有人尝试过铸造这么大的镜子。事实证明，要铸造它需要3个大坩埚同时工作。第一面镜子是1842年4月铸造的，但在此之后所有的铸造都进行得不顺利，要得到两面耐用的镜子，需要铸造5次。这两面镜子每一个重4吨。这个“帕森城的利维坦”拥有巨大的镜筒，该镜筒按照自然状态悬吊在两堵砖墙间向南的方位上。人们设计这一庞然大物的目的是要用它对星云天文学中的一个经典问题做最后的决断。该问题是：所有的星云都仅仅是遥远距离上的星团吗？

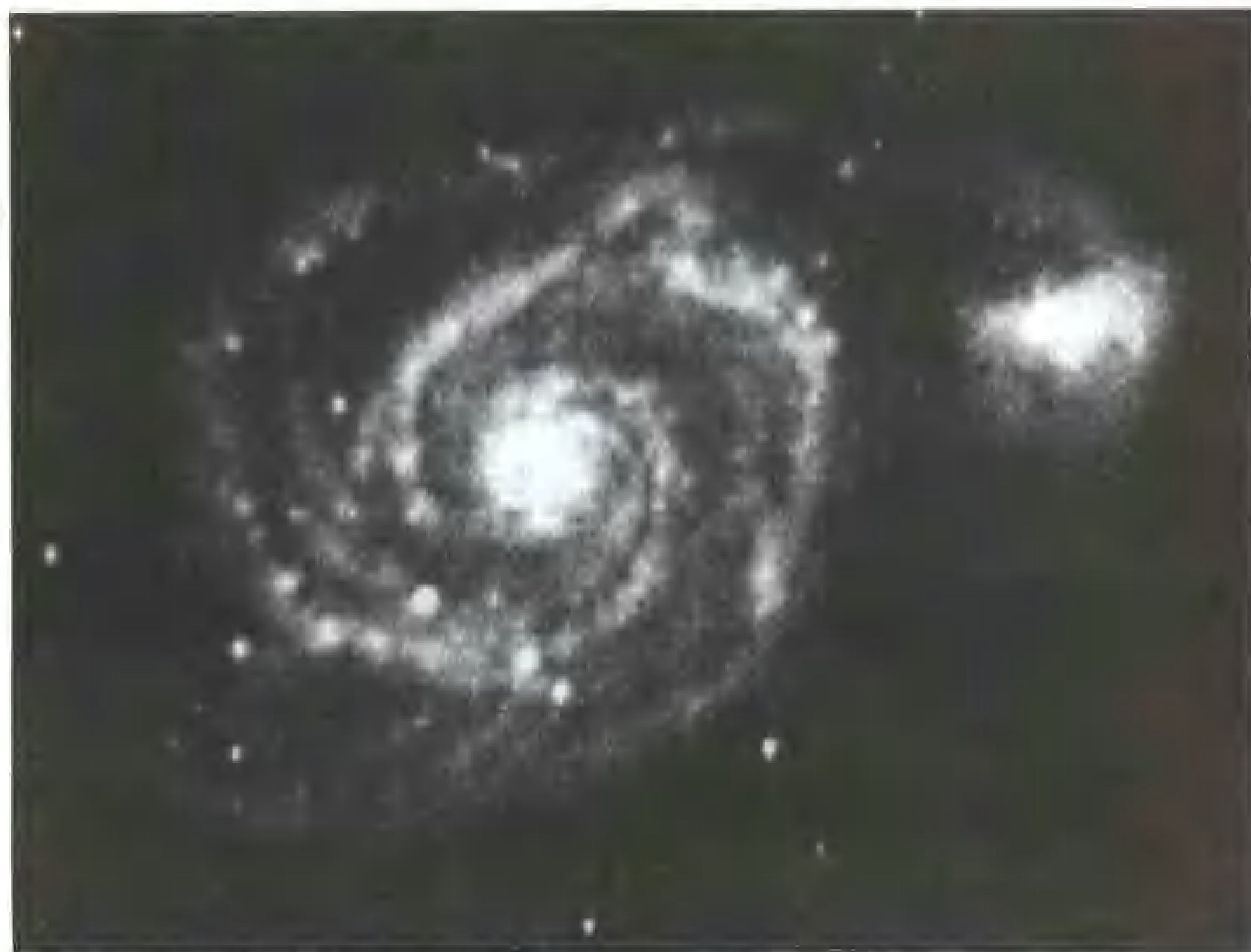
1845年2月，这架庞然大物首次用于观测，几个星期之后罗斯就宣布说发现了一些星云是呈螺旋状的。对罗斯所绘的漂亮的M51梗概图与约翰·赫歇尔所绘之图以及现代摄影术所摄照片的比较，证明了这架庞然大物的威力。

然而，在许多方面，它的潜能还未得到充分发挥。1840年晚期，当这架仪器正处于它的最佳使用期时，一场可怕的马铃薯饥荒席卷爱尔兰大地，罗斯这位公

装配了重达4吨的6英尺反射镜的“帕森城的利维坦”。该仪器镜筒指南，其设计意图主要是为了当星云越过子午线的时候能够观测到它们。人们希望通过这种方式把这些星云分解成组成它们的恒星。第一面镜子铸造于1842年，同年晚些时候开始安装，1845年2月首次用于观测。到了4月，罗斯就发现了M51的螺旋形结构。



上图：罗斯所绘的M51，它首次辨识出了星云的螺旋结构。该图绘于1845年4月，在6月召开的不列颠科学促进会上被传播开来。约翰·赫歇尔把这架巨型反射式望远镜描述成为"在这方面的一个巨大成就……我希望能找到合适的词汇来表达我对它的赞美之情。"



右图：与赫歇尔自己所绘的原始图（见本书第238页）不同，罗斯所绘的星云图经得住与现代摄影术的比较。

众领袖、地主无法把他的精力集中于恒星世界，因为他的佃户们都躺在床上奄奄一息。此外，对于罗斯来说，对这架大反射望远镜的制作以及对它所涉及的技术上的挑战的解决，都是以其本身为目的的。罗斯不是赫歇尔，他只偶尔进行观测；他欢迎到访者使用这架望远镜；如果助手平庸、缺乏创意，他就雇用知名人士；但这代替不了赫歇尔们的献身精神。

当这架仪器转向猎户座星云时，决定性的测试开始了。如果每一团星云都是星团的话，当用这个庞然大物进行审视时，首先猎户座星云就会揭示出它的布满星星的本质，因为它看上去较大，因而也就离我们较近。

1846年3月，罗斯宣布说在该星云中确实看到了无数星星。事实上，罗斯描述的这些恒星的确是存在的，但它们是深深地隐藏在通常的气状星云里面的。这一发现的意义当时没有被很好地领悟。由此得到的对该星云以及其它重要星云的解说，使得怀疑论者之外的大多数人都相信，那种存在真正的星云而且它们会缩聚成恒星的说法已经不成立了。

但是怀疑论者仍然存在。就像1770年时的赫歇尔一样，在遥远的莫斯科东边的喀山大学的米哈伊尔·赖亚普诺夫（Mikhail V.Lyapunov）就使他自己以及权威的威廉姆·斯特鲁维相信，在猎户座星云中正发生着比较大的变化。斯特鲁维这样说道："那些解说中所谓的奇迹，只不过是错觉而已。"

这种变化的真实性确实是可以争论的，但一个星云的完全消失则是不可能的。1852年，伦敦热根公园乔治主教的私人天文台的天文学家约翰·欣德（John R. Hind，1823－1895年）报告说，在金牛座发现了一团小星云。随后的几年里人们曾多次看到过该星云。海王星的共同发现者达勒斯特（Heinrich Louis d'Arrest，1822－1875年）（见本书第182页）当时在哥本哈根大学，他对该星云的位置和外观做过详细研究，但1861年10月，他怎么也找不到这团星云了。星云消失了的消息很快传播开来，人们都在谈论这团"隐藏起来了的奇妙的星云"。但就在这一年，达勒斯特和奥托·斯特鲁维（Otto Struve，威廉姆的儿子）都又重新找到了它。

这是一个例子，它表明那些真实的确定无疑的事物最终也会变化。别的类似的主张也开始被认真地提了出来，人们对把星云等同于星团的看法开始悄悄地产生了新的怀疑。但到了1864年，存在着真正的星云的决定性证据被发现了。该证据表明，某些星云的光确实是产生于气而不是产生于恒星。但该证据不是通过传统的观测方法，而是通过实验室中的物理分析技术而得以揭示出来的。这种物理分析技术掀开了天文学史的新的一页。

（关增建译）

第八章　星光的信息：天体物理学之兴起

从古代到文艺复兴，天文学家的主要任务是设计出一些几何模型，来再现行星在不变的恒星背景下的运动。17世纪，开普勒教会天文学家们去探求引起行星运动的力；1687年牛顿《原理》出版的后果，使得天体力学的日常工作变成证明这些行星的运动和太阳系内所有其他天体的运动只有一个单一的物理原因——平方反比规律的万有引力的牵引。相反，晚至19世纪中叶，恒星天文学始终停留在耐心地编辑更精确更完备的恒星位置和亮度的星表阶段上，这项单调的工作始于古代的希帕恰斯（Hipparchus）和托勒密（Ptolemy）。

所有的这一切在19世纪的后半叶都改变了，那时棱镜被安装到望远镜的目镜端，所产生的像彩虹一样的光谱被用于分析其中包含的信息。中世纪的天文学家是几何学家，18世纪的天文学家是天体力学家；现在，到了19世纪下半叶，天文学家必须掌握实验物理学家所专长的光谱研究的技巧。那些光谱学家的理论和技术被应用到星光的研究中，这使得天体物理学家能够洞察在恒星中运行的物理过程，并确定它们在三维空间中的运动。星光和神秘的星云现在成了兴趣的焦点，甚至作为边缘学科的宇宙学也被吸收到天文学的主流中来。

天文学成果的出版，天文学家的组织（1665—1950年）

在天文学的组织方面也正在发生一场相应的革命。15世纪中叶印刷术的发明，已经使得一些解释最新天文学奇观的大幅印刷品和小册子等快速出版物的出现成为可能。但是，天文学知识上的重大进展继续写成书籍出版，而书往往要经历数年的写作并印刷出来之后才能同读者见面。

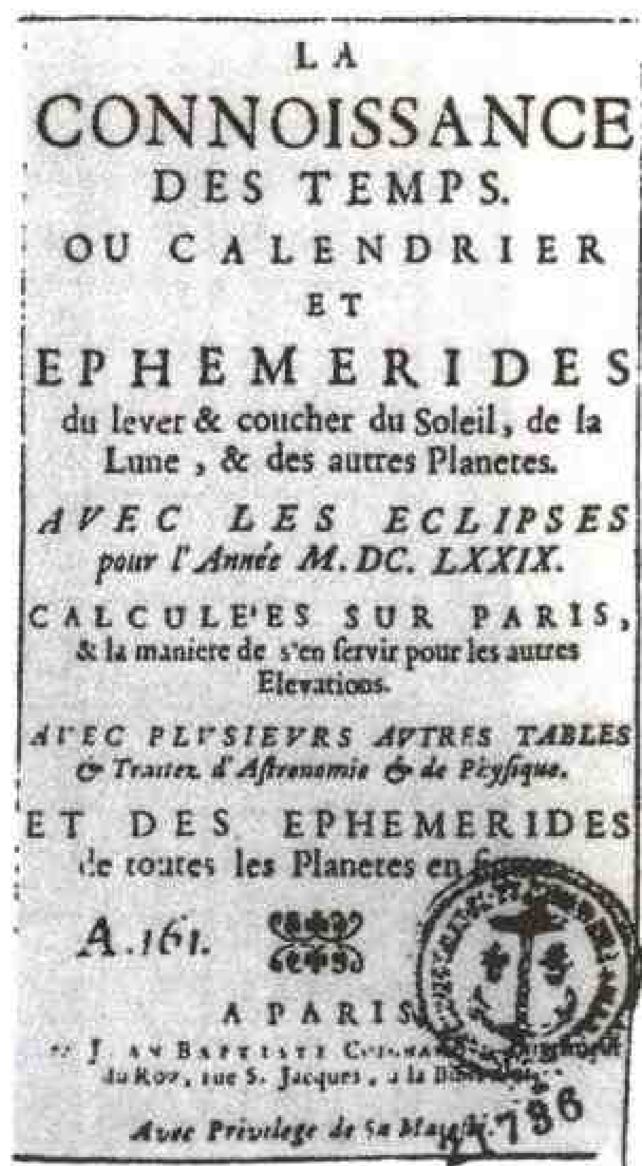
1665年伦敦皇家学会《哲学会报》的出版，极大地加速了科学前进的步伐。该会报脱胎于由学会秘书亨利·奥登伯格（Henry Oldenberg）管理的国际信件交往，但很快就由学会接管并作为正式月刊出版。

光谱学核心方面的发现为当时科学新闻传播的速度提供了一个好的范例。1672年早期牛顿被劝说和《哲学会报》的读者们一起分享他关于太阳光不是单一的而是由很多颜色合成的发现（见本书第248-249页）。立刻，吃惊和愤怒的牛顿发现他自己处在了来自国内和海外评论家的广泛攻击之下。

第一册年报的出版献给了天文学，那就是1679年始于巴黎的《时间知识》（Connoissance des Temps）。它最初的目的只是为了发表关于即将来临的太阳、月亮和行星位置的星表和其他一些与观天者和航海者有关的表格资料，但是不久它就开始包括一些相关热门话题的文章。不久以后，一些具有更加固定兴趣的卷册开始随处可见，到17世纪晚期和18世纪，一些公共天文台建立了起来，他们认识到他们有义务以印刷品的形式散布他们的观测结果，这也是他们存在的理由

(raison d' ê tre)。到了19世纪，一个天文台把它们的出版物赠送给名望相当的另外一些天文台，作为交换，也从它们那里获得其它出版物，这已是很正常的事了。

萨克斯堡（SaxeCoburg）公爵天文学家察奇（Franz Xaver von Zach，1754-1832年）于1800年创立了一种月刊《每月通讯》(Monatliche Correspondenz)，致力于所有的新科学知识尤其是天文学知识的传播。第一种专门致力于天文学的快速出版刊物是由德国天文学家兼航海家舒马赫(Heinrich Christian Schumacher，1780-1850年)于1823年创立的《天文通报》(Astronomische Nachrichten)。舒马赫曾被称作“天文邮政大臣”，他“给每一位人写信，也把每一位的来信抄送给每一位其他人”。为了减轻他的通信压力，他把信件交给当地一个印刷工打印出来，每隔数周就给一个国际邮件列表中的每一位发送一次。这本杂志在今天仍然以同样的名字出版，尽管对于其中最紧要的内容的交流已被电报和最近的电子邮件所取代了。


LA
CONNOISSANCE
DES TEMPS.
OU CALENDRIER
ET
EPHEMERIDES
du lever & coucher du Soleil, de la Lune, & des autres Planetes.
AVEC LES ECLIPSES
pour l'Année M.DC. LXXIX.
CALCULE'ES SUR PARIS,
& la maniere de s'en servir pour les autres Elevations.
AVEC PLUSIEURS AUTRES TABLES
& Traitez d'Astronomie & de Physique.
ET DES EPHEMERIDES
de toutes les Planetes en figures.
A.161.
A PARIS
Avec Privilege de Sa Majesté.

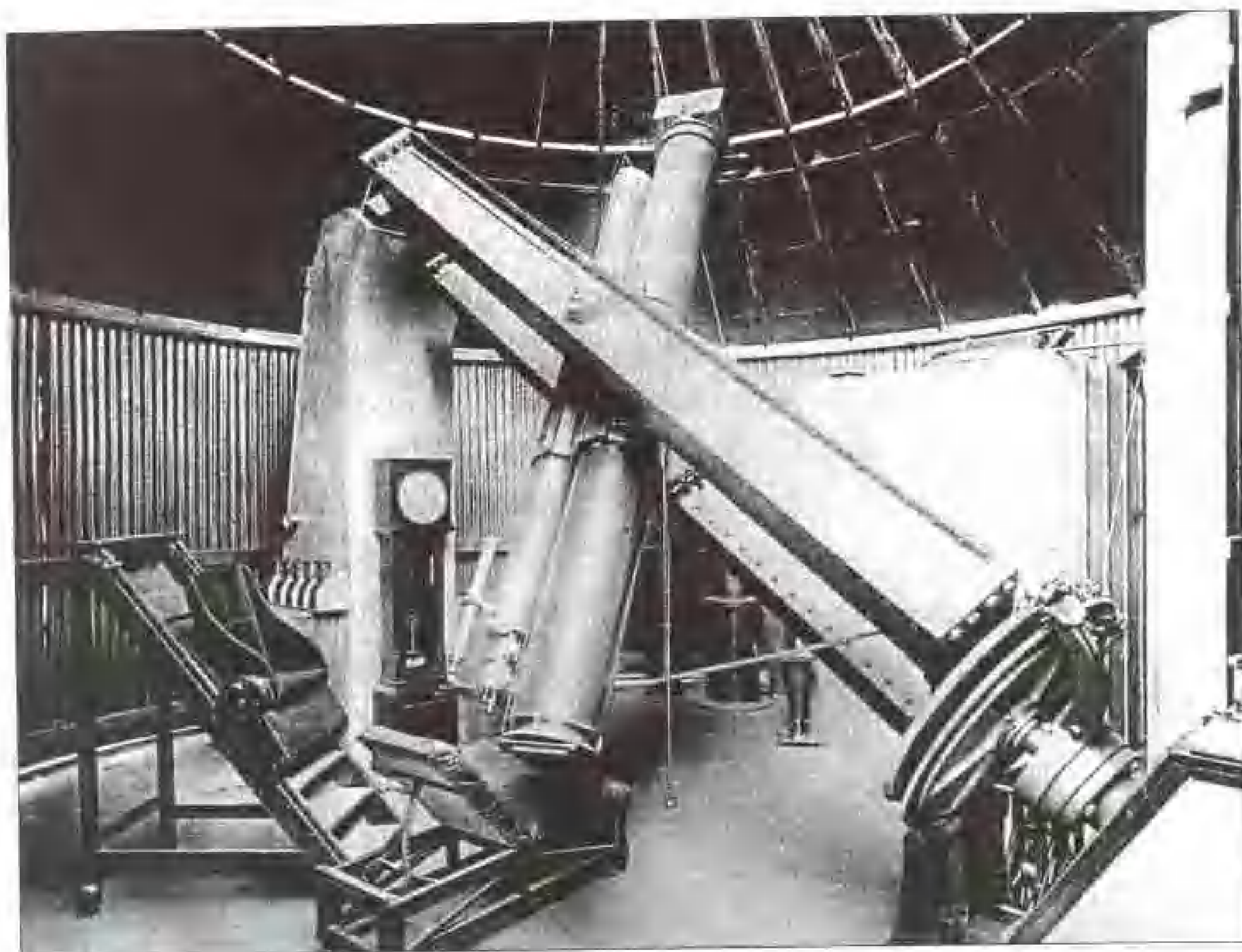
1679年的第一卷《时间知识》扉页。星历表（一段给定时间内的天体位置表）长期以来一直是天文学家和星占学家的基本工具。巴黎天文台决定出版逐年的星历表和有关资料——但不包括星占学的；这第一卷“清除了所有那些在此类工作中迄今仍然充斥着的荒谬之物”。

伦敦的皇家学会创始于1660年，作为一个迎合各种各样的科学（和准科学）兴趣的业余社团，直到19世纪中叶以前，它还保持着主要的业余特征。学会的成员或“院士”的社会地位，以及他投身于学会工作的能力，跟他所拥有的科学知识一样重要。19世纪早期，英格兰的一群负责任的天文学家——像牛津、剑桥的学院式天文学教授，皇家天文学家这样的职业观测者，还有像赫歇尔一家这样专注的业余天文学家——已经认识到，他们需要某种形式的论坛，一个只有专门的天文学社团才能提供的论坛。在当时害怕竞争的皇家学会主席的反对声中，伦敦天文学会于1820年成立，11年后才受到皇家特许，成为皇家天文学会。皇家天文学会定期举行会议，会上讨论和介绍最新的发现，它以一家研究性图书馆作为它的活动场所，突出成就者被授予学会勋章。学会建立之初的数月内便开始出版它的《皇家天文学会论文集》(Memoirs)，为观测结果数据表以及类似资料的扩散提供了一个媒介。另有一种需求就是为研究性评注较少的天文学新知识的快速公布提供一个窗口，为此，学会在1827年创立了《皇家天文学会月刊》(Monthly Notices)。

从欧洲到新大陆，类似的全国性和地方性的学会和期刊开始纷纷出现。在美国，1849年古尔德（Benjamin Apthorp Gould，1824-1896年）创办《天文学报》(Astronomical Journal)。古尔德曾在哥廷根师从高斯（C.E.Gauss），获得博士学位后，带着明确的目的回到家乡——发展美国的天文学。由于《天文学报》不是一个注册学会的学报，易受外界因素影响，因此它的出版受美国内战的影响而中断，但古尔德最终在其停顿了四分之一个世纪后使它重新出版。

在欧洲大陆，1862年在海德堡成立了天文学会（Astronomische Gesellschaft)。该学会尽管主要是由德国人组成，但它的会员资格非常明确地向其他国家公开。学会在天文学界所处的领导角色也与它的国际地位相符。从1881年开始，它开始参与发行《天文通报》(Astronomische Nachrichten)。1898年它帮助创办了《天文年报》(Astronomischer Jahrsbericht)，该杂志致力于出版每

1890年安装在悉尼天文台为《照相天图》(Carte du Ciel)工作的仪器。为了保证一致性，该计划的照相折射镜严格按照保罗·亨利和普鲁斯珀·亨利为巴黎天文台改进的设计制造。

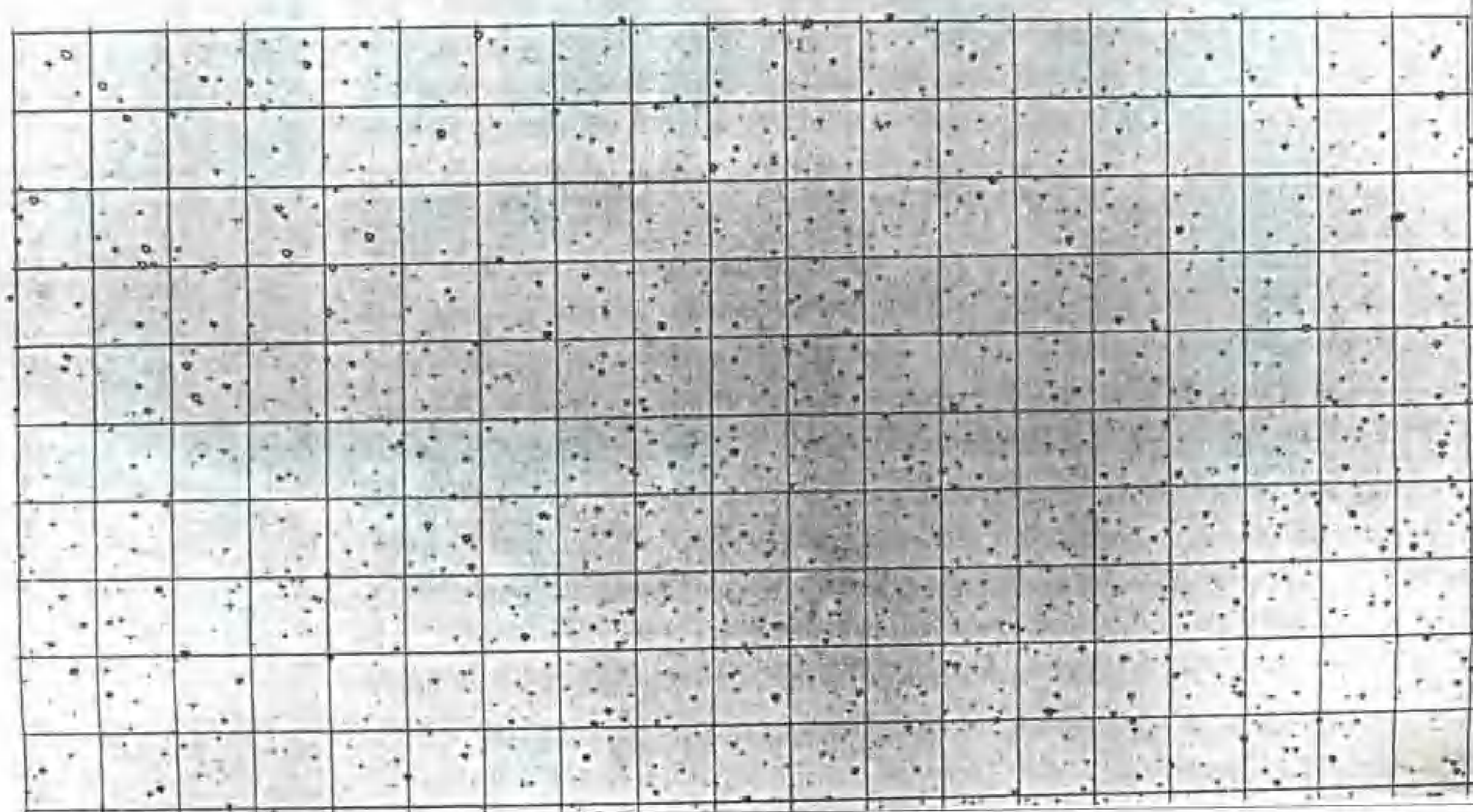


下图：组成《照相天图》的上千幅星图之其中一幅的一小部分，该图来自圣费尔南多天文台。每幅照片上的1厘米见方的精确网格用于帮助测量。

CARTA FOTOGRAFICA DEL CIELO

Posicion del centro para 1900 $\left\{ \begin{array}{l} AR = 7^h 24^m \\ D = -5^\circ \end{array} \right.$

Zona - 5° N° 56



一篇天文学出版物的摘要。这一举动对天文学研究有无法估量的价值，到现在每年出版的摘要已经超过6000页（从1969年起，德国出版商屈服于英语在天文学家中间的优势地位，改作现刊名《天文学和天体物理学文摘》（Astronomy and Astrophysics Abstracts））。

致力于寻找火星－木星间隙（Mars–Jupiter gap）间的行星而于1800年组建于里连陶（Lilienthal）的24名"天球警察"（'celestial police'）组织（见第178页）或许是第一个天文学国际合作组织的实例。在19世纪下半叶可以看到更多的合作计划，以获得靠任何一个单位的资源所不能获得的成果。从1859年到1863年，波恩的阿格兰德尔（F. W. A. Argelander，1799–1875年）发表了三册包含将近33万颗恒星的《波恩星表》（Bonner Durchmusterung）和44幅图版的星图。这是一个波恩观天者小型团体的工作成果。该星表被证明对后来的观天者有很大价值，然而所列的恒星位置没有也无需那么精确。所以，1867年阿格兰德尔向天文学会建议组织一个计划，来精确测定《波恩星表》中直至9等星的所有恒星的准确位置。这个提议被接受后，这项任务由17个天文台分担，这些天文台都为一个共同的计划工作。

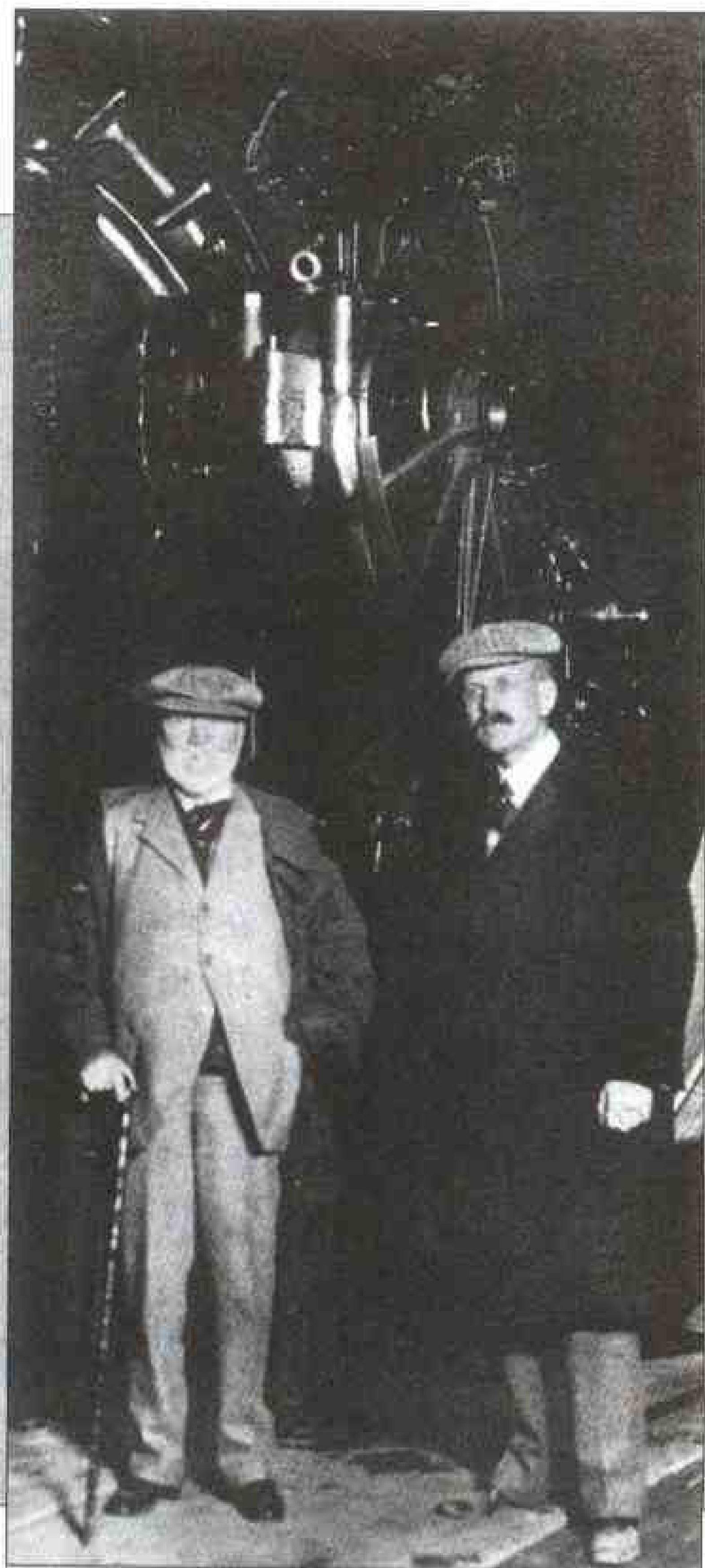
然而这项工作的进展缓慢。倒不是全因为某些参与的单位

乔治·艾勒里·海耳

海耳于1868年6月29日出生于芝加哥，是一位富商的儿子。他求学于麻省理工学院，毕业前就发明了一种"太阳分色照相仪"，用来对日珥进行全天候照相。1892年他被聘为芝加哥大学天体物理学副教授，在那里他创办了《天体物理学学报》，如今该杂志仍是该领域公认的第一流杂志。他还说动了富翁查尔斯·叶凯士捐资建造叶凯士天文台。接下来在1904年，他从华盛顿卡内基学院获得一笔捐助用来在加利福尼亚帕萨迪纳附近的威尔逊山上建造一座太阳塔。四年后，当时世界上最大的反射望远镜在威尔逊山天文台落成，它使用了海耳父亲提供的60英寸镜子。〔安德鲁·卡内基（左侧持手杖者）与海耳在威尔逊山上〕。1917年，加利福尼亚商人约翰·胡克为威尔逊山添加了一台100英寸反射望远镜。

不久之后，海耳开始筹建200英寸望远镜，该望远镜计划建造在帕洛玛山，由洛克菲勒基金部分资助。海耳在它于1948年完工之前去世。这样，海耳成了建造连续三架反射望远镜的天才组织者，而且每一台都是当时世界上最大的。

对于后来的美国天文学会，以及后来被归入国际天文联合会的太阳合作研究国际联合会的建立，海耳都扮演了主要的角色。同时他从事他自己在太阳物理方面的基础研究。尽管他有不稳定的健康状况，但海耳为发展天文学所做的工作，还是比历史上任何一个人做得都多。1938年2月21日海耳在加利福尼亚帕萨迪纳去世。



国际天文联合会

国际天文联合会（IAU）建立于1919年，会中分设众多的"专业委员会"，每个专业委员会致力于一个天文学领域的研究并把在该领域工作的国际天文联合会会员组织起来。这些专业委员会鼓励合作研究并确定标准和术语。譬如，先前星座的边界彼此模糊、相互重叠，1930年国际天文联合会给定了精确的星座边界。每隔三年国际天文联合会就有一次大会，会上来自几乎所有国家的天文学家聚在一起，讨论他们领域内的最近研究。并且，作为这些大聚会的补充，国际天文联合会还发展起了一些经常性的专家讨论会和座谈会。

国际天文联合会能够在国际舞台上为天文学说话，保护这一门科学的利益，譬如，抵制由于城市灯光造成的对夜空的过度污染，或者抵制一些不必要的碎片残骸搅乱了地球外层大气而干扰了研究。尽管因为把一次世界大战战败国的天文学家们排除出去而受到破坏，尽管成员国在提供必须的经费方面还有诸多问题，但国际天文联合会现在依然是全世界天文学组织的中心。

最后没有完成承诺的工作，而是计划本身在某种程度上被一种新发展起来的技术即照相术在天文学中的应用（见273页）所取代。1885年巴黎天文台台长莫彻茨（Admiral E.B. Mouchez，1821—1892年）提出编制一种巨大的照相天图的可能性。来自国外同行的第一反应是鼓舞人心的，所以巴黎科学院发出邀请于1887年4月于巴黎聚会。来自19个国家的56名科学家出席了会议，会议确立了一个持久的项目，以筹措完成一份《照相天图》(Carte du Ciel)——一份直至14等星的照相天空图——并通过照相测量制定一份到11等星的精确星表。为了保证必要的体例统一，许多决定被要求执行，其中一些项目需要进一步的研究。直到第一次世界大战，《照相天图》永久国际委员会是惟一的国际天文学组织。然而这项工作逐渐步入了困境，一些天文台退出了，一些则给出了不符合标准的结果，直到1964年才完成星表的出版。

1904年，在美国人海耳的鼓动下，在美国科学院和太阳合作研究国际联合会（International Union for Co-operation in Solar Research）的积极支持下，在建构上为国际天文学合作带来一次巨大的进展。太阳合作研究国际联合会和《照相天图》委员会在它们各自领域内取得的成功经验，使得天文学家们易于接受建立一个国际合作组织的建议。处于一次大战胜利气氛中的各学科科学家也促成了这一组织的建立。1919年国际天文学联合会成立，虽然起初战败国被排除在外——德国直到1952年才重新加入该组织，但国际天文学联合会在天文学组织方面一直扮演着中心角色。

太阳和天体物理学的起源（1800 — 1890年）

直到1672年牛顿发表关于光和颜色的新理论之前，人们认为白光是简单的和

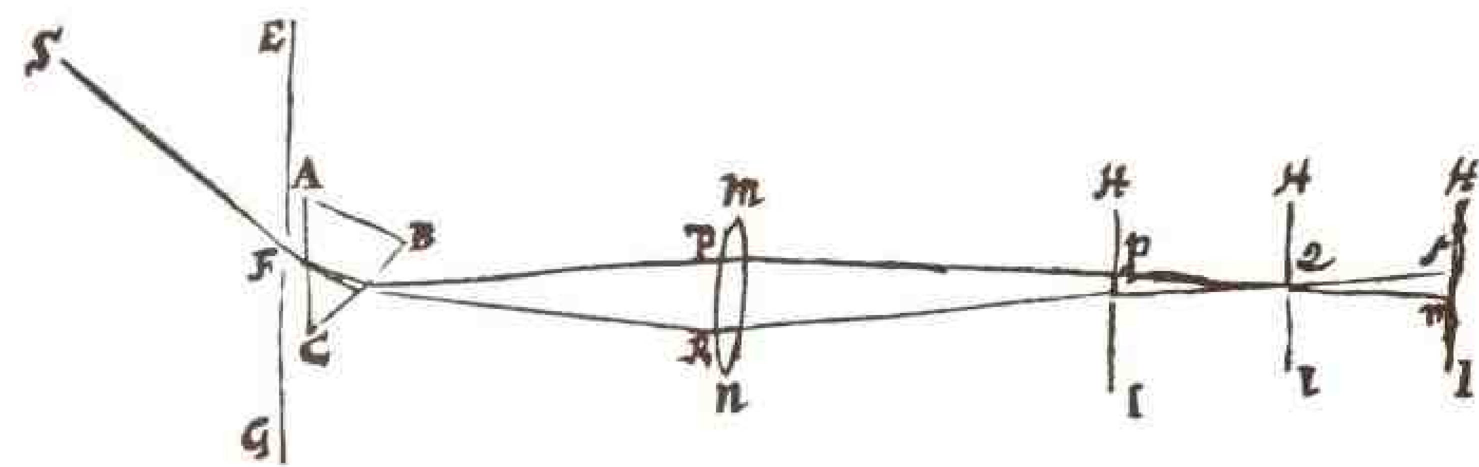
基本的，颜色是白光的修正——就是某种让白光变红或变蓝的机制。

有关白光如何变红或变蓝，有各种各样的理论。出于好奇而去检验这些理论，牛顿买了一块三棱镜，躲到他在三一学院的寝室里做了一个实验。他关紧窗户，在上面挖了一个圆形小孔。太阳光通过小孔，透过三棱镜，形成的光斑透射在一定距离的屏幕上。

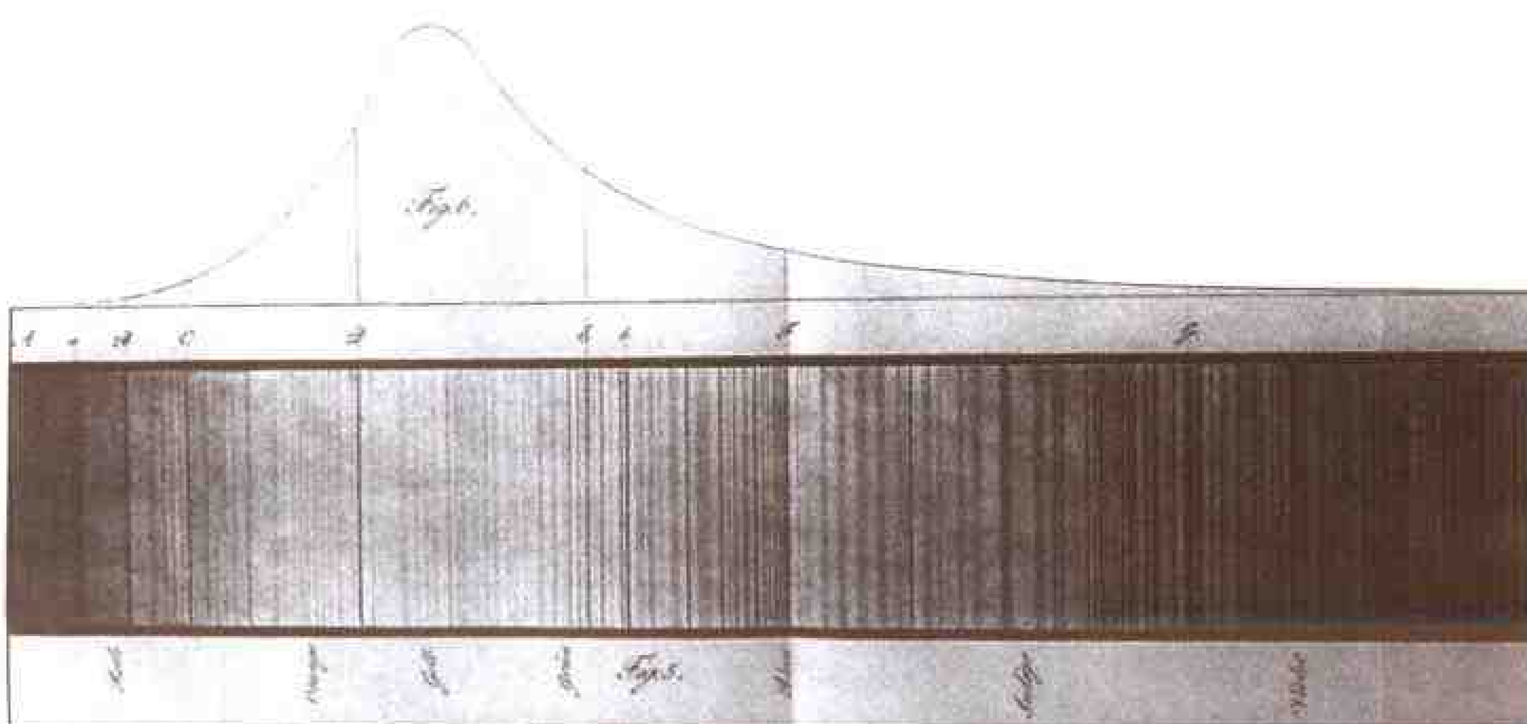
太阳光斑有像彩虹一样的颜色是没有什么新奇的，而牛顿使得它们更“引人注目”。是屏幕上产生的光斑的形状引起了他的注意，因为它不符合通常的修正理论。在一系列深入的实验之后，牛顿得出结论：白光远不是简单的，它事实上由各种颜色复合而成。他继续演示了他的彩色光谱可以利用透镜重新汇聚成白光。

1802 年英国化学家沃拉斯顿（William Hyde Wollaston，1776 – 1828 年）用更精致的方法重复了牛顿的工作。牛顿的圆形小孔被代之以只有二十分之一英寸宽的一条窄缝。太阳光谱避免了各种颜色间的重叠，显示出七条相对较暗的线束，他把它们当做各种颜色间的自然边界。

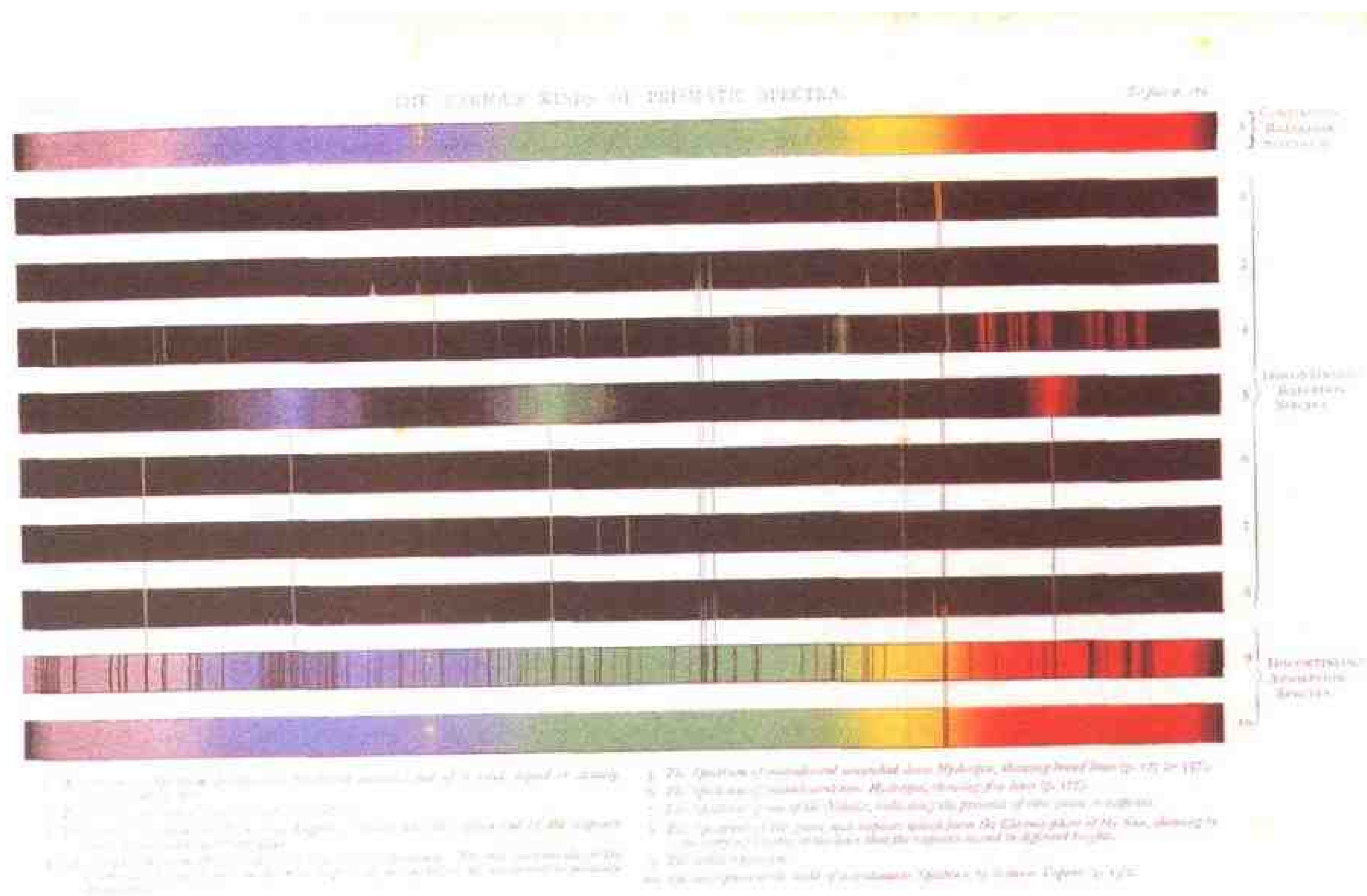
那种简单的解释是不充分的，这一点在巴伐利亚仪器制造者夫琅和费（Joseph Fraunhofer，1787–1826 年）为改进透镜设计而发明了第一个简单的分光镜之后显得更明显了。夫琅和费让太阳光通过极细的缝隙，接着透过一块三棱镜，然后通过一架望远镜检查那光谱。他惊奇地发现了数百条暗线，而不是沃拉斯顿的七条暗线。他数出了将近六百条暗线，并画了一幅图，他用字母表中的字母，从 A、B、C 开始，来表示从红端起的那些非常暗、特别显著的暗线。直至今日，这些字母因其方便性而仍在使用。太阳光谱因此被叫做“夫琅和费光谱”。



牛顿图示如何把各个颜色重新复合成白光。来自太阳的光（左边）进入小孔 F，被棱镜分解成彩色光。透镜组把彩色光聚拢，投射到屏幕 HI 上，如果 HI 位于位置 Q 处，彩色光就变成白光。



夫琅和费 1817 年发表的太阳光谱图中的一部分（Fig5）。他仔细地描绘了超过 300 条暗线的位置，并根据肉眼判断把余下的也加了进去。谱线上部呈曲线状的是根据肉眼判断的谱线强度（Fig6），在黄绿光处达到峰值。



洛克耶《太阳物理学论稿》中的一幅图版，指出实验室光谱和天文学光谱本质上的相同之处。上部（1）是白热固体的连续光谱，接着（2）是固定火焰的光谱，下部（10）是通过固定火焰看到的（1）、（3）到（6）是实验室各种元素的发射谱线，（7）星云的发射线。（8）太阳色球的发射线（9）太阳的夫琅和费光谱。

夫琅和费是个实用光学家而不是一位“科学家”。他很感兴趣地发现黄光中的D线似乎正好和出现在很多火焰中的亮线重合。这样一条无处不在的非常纯的黄色光线，曾经被18世纪中叶一位著名的年轻的苏格兰人梅尔维尔（Thomas Melvill）观测到过。梅尔维尔于1753年英年早逝，年仅27岁。虽然梅尔维尔的发现被发表了，但它出现在一本主旨不明的文章集子里，几乎没有引起人们的任何注意。相反，夫琅和费的发现则引起了广泛的兴趣。

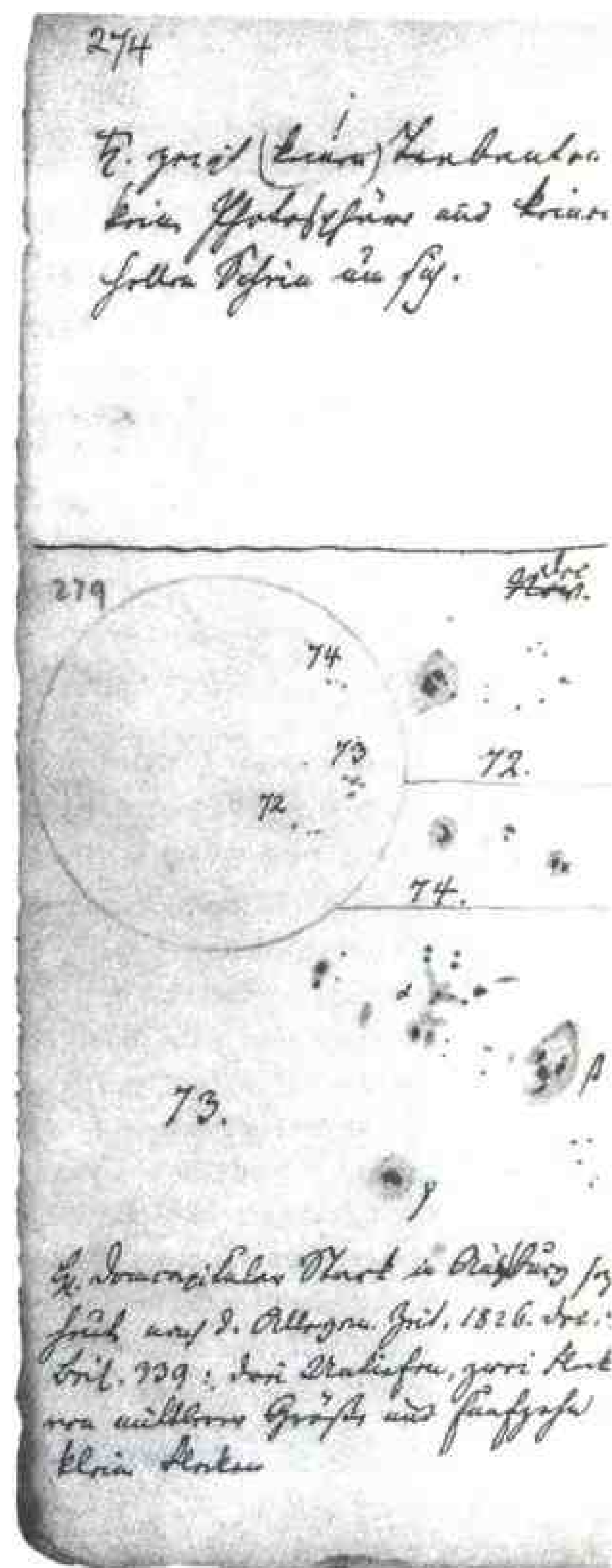
在所导致的广泛研究中，关键的实验由海德堡化学家本生（Robert Bunsen，1811－1899年）和他的合作者物理学家基尔霍夫（Gustav Kirchhoff，1824－1887年）完成。他们在1859年宣布的第一项发现是：特殊的线系与单独的化学元素有关。伦敦大学国王学院的威廉·米勒（William Miller，1817－1880年）已经注意到两根金属棒之间激发出来的电弧所发射的光线会随着不同的金属而改变。通过在实验室里的许多测量，本生和基尔霍夫确认了许多谱线与不同金属的对应关系，并且通过他们的光谱线确认了两种新元素铯（caesium，一个拉丁词汇，意为蓝灰色）和铷（rubidium，意为红色）从而大大巩固了他们的结论。对许多研究者而言，一个令人困惑的问题是，即使是非常纯的金属样本被放到火焰中，夫琅和费的D线也总是出现在光谱中。事情只是在慢慢地变得明朗——这本身也是一个重要的发现——光谱测试是非常敏感的，即使是非常微量的一点钠，它存在于例如普通的食盐中，也会产生那条D线。来自本生化学实验室的高纯度金属和

化合物是这项工作的基本特征。

后来基尔霍夫于1859年在海德堡他的物理实验室里完成的一个实验让人们明白了这些谱线是如何产生的。他通过黄色的钠焰来观察太阳的光谱，期望火焰的亮线来填补太阳光谱中的暗线；相反，暗线变得更暗了。在一个类似的实验中，用白炽灯代替太阳作为光源，也显示出一条暗线。他推断，夫琅和费的暗D线之产生，是由于钠蒸气存在于包围太阳的热大气中，并吸收了这一特别波长的光。这一解释被普遍接受。这样的谱线被叫做“吸收线”。

人们接着认识到光谱分析可以用之于太阳：实验室里火焰和电弧中的亮线（这叫“发射线”）跟太阳光谱中的暗线是同一些线——夫琅和费本人便已在一些非常明亮恒星的光谱中看到了几条特别显著的暗线，包括D线。19世纪早期，法国哲学家孔德（Auguste Comte）引用恒星化学组成作为例子，来说明事物固有的不可知性。现在这些是可知的了：几种金属被确认存在于太阳，数年之内这个名单还会大大加长。尤其是1862年瑞典乌普萨拉（Uppsala）的物理学教授昂斯特洛姆（A.J. Angstrom，1814－1874年）成功地展示了，天然气体元素氢也存在于太阳大气中。到19世纪80年代末从太阳光谱中确认了大约五十种已知的元素。这种实验室分光镜和太阳分光镜的结合，是天体物理学史上的一大飞跃。

施瓦布绘制的1826年12月3日的太阳圆面图，这是众多细心绘图中的一幅。他积累了42年的有规律的观测，后来把它们贡献给了皇家天文学会。施瓦布在柏林大学学习药剂学时对天文学产生了兴趣，在1829年他为了把精力用于科学研究而变卖了他家里的生意。



海因利希·施瓦布（Heinrich Schwabe）和太阳黑子周期的发现（1843年）

在第五章我们已经看到太阳黑子是人们利用新发明的望远镜进行研究的第一批天象之一（比较危险地观察日落时变红的太阳圆盘），并且在17世纪早期就令人惊奇地确立了有关太阳黑子的一些基本事实。它们不是行星际空间的物体，而是以某种方式附着在太阳上——有可能是太阳大气中的乌云，或者是飘浮在太阳炽热表面的灰烬块，或者也许是透过发光大气的间隙看到的暗色太阳表面，而太阳大气是光线的来源。太阳绕它的固定于空间的自转轴自转，自转周期为26天，有一到二天的变化。太阳黑子几乎不出现在太阳赤道以北或以南30°以外的地方。

但是太阳黑子是零星的现象，从中很难获得更多的知识。事实上到1618年，太阳黑子似乎就很少发生了。所以，在18世纪，除了较大的和大量的黑子出现会偶尔引起人们的兴趣外，对黑子很少有人做系统研究。

柏林西南小镇德韶（Dessau）人海因利希·施瓦布带来了一个变化。作为一名对天文学感兴趣的药剂师，他在1826年从慕尼黑购买了一架小型望远镜。在他的朋友哥廷根天文台的哈丁（K.L Harding）的建议下，他开始有规律地观测太阳。只要天气和时间许可，他就进行观测。他的兴趣是寻找一颗位于水星和太阳之间的尚未被发现的行星。这样一个天体必定会呈现为一个小黑点通过太阳圆面，但是只有持续的观测才能捕捉到它，并且也只有靠有规律的记录才能把它跟小的太阳黑子区分开来。

施瓦布以值得称赞的耐心进行观测和记录。17年之后，他还是没有

发现一颗新行星，但是他能够宣布，太阳黑子似乎以相当系统的方式出现和消失，每隔大约十年太阳圆面上就覆盖更多的黑子，其间出现对应的最小值。1843年他发表在《天文学快报》上的一则谦虚的笔记没有引起人们的多少注意。但他继续收集观测记录，1851年著名的德国旅行家和自然历史学家洪堡（Alexander von Humboldt，1769—1859年）在他的《宇宙》（Kosmos）中的记述，引发了人们对这些观测记录意义的注意。德韶镇上的业余爱好者被授予皇家天文学会金质奖章，至今仍在天文学界被传为美谈。在长时间尺度上，太阳黑子周期的长度事实上是十一年多一点，但间隔不是很精确，在施瓦布观测的早年这个间隔接近十年。

太阳黑子和地球磁场

要了解洪堡对施瓦布的发现所赋予的重要性，我们必须追溯到施瓦布刚开始他的观测的那个年代，那些初看起来与天文学毫不相关的自然事件。拿磁针当做指示方向的指北装置已经被水手们使用了好几个世纪了。但是磁针指向的磁极不是地理上的北极，更有甚者，磁极在地球表面缓慢地移动。这些还不是其复杂性的全部：早在1722年人们就知道磁极有一个极小的周日的变化。

1828年，洪堡筹备了一项大规模的地磁国际研究，该项研究以哥廷根大学天文台为基地，在高斯的指导下进行。数年之内，一个世界范围的地磁观测网投入运作。到1851年，慕尼黑天文台台长苏格兰人拉蒙特（John Lamont，1805－1879年）在1835年到1850年的地磁观测中发现了显著的证据表明，地磁以大约$10\frac{1}{3}$年的固定周期发生变化。爱德华·萨拜因爵士（Sir Edward Sabine，1788－1883年），一位英国海军军官和未来的皇家学会主席，相当独立地使用不同的数据后发现，磁针偶尔的突然变化和剧烈的颤动（洪堡把这个现象叫做磁暴），每经过大约十年的间隔，就来得更猛烈更频繁。

是萨拜因在1852年宣布了太阳黑子周期和地磁活动之间有着显著的相关性。这一结论是他从数百个天文台超过二十年的观测资料中推断得出的。他的发现使对太阳的研究从好奇提升到实用阶段。因为既然太阳能够影响磁针，它也许还能影响到别的？是否影响天气？是否能用它来预报印度谷物歉收将带来的饥荒？

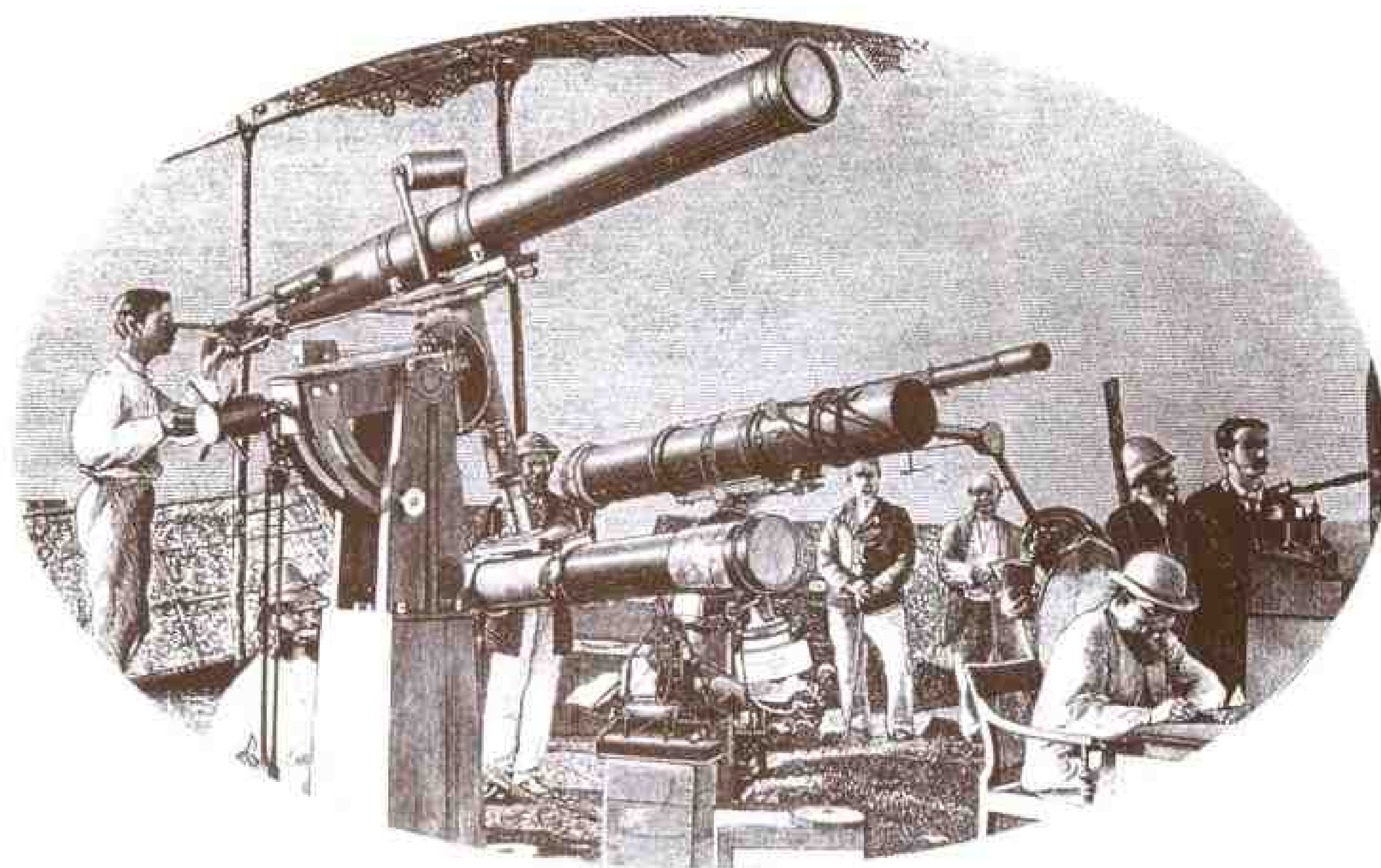
1859年9月的一个早晨，英国业余天文学家卡灵顿（R.C.Carrington，1826—1875年）和霍奇森（Richard Hodgson，1804－1872年）的两次独立的太阳观测，有力地证实了日地关系的现实性。在一个大黑子群边上爆发出两个白光亮斑，这过程持续了5分钟。这次爆发非常显著，卡灵顿和霍奇森都很仔细地记录下了它的爆发过程。与此同时，地球上爆发了剧烈的磁暴，电报通讯中断，那一个晚上，天空飘舞着从未见过的最为绚烂的北极光。

随着同一年由分光镜带来的发现，太阳物理学应运而生。但是，卡灵顿和霍奇森最先注意到的太阳耀斑发射出的X射线和远紫外辐射，还有辐射到空间的带电基本粒子流，它们的复杂起因和影响，直到将近一个世纪后才被揭示。

日食观测远征队

基尔霍夫对太阳光谱中暗吸收线的解释需要有一层大气包围着太阳，这层大

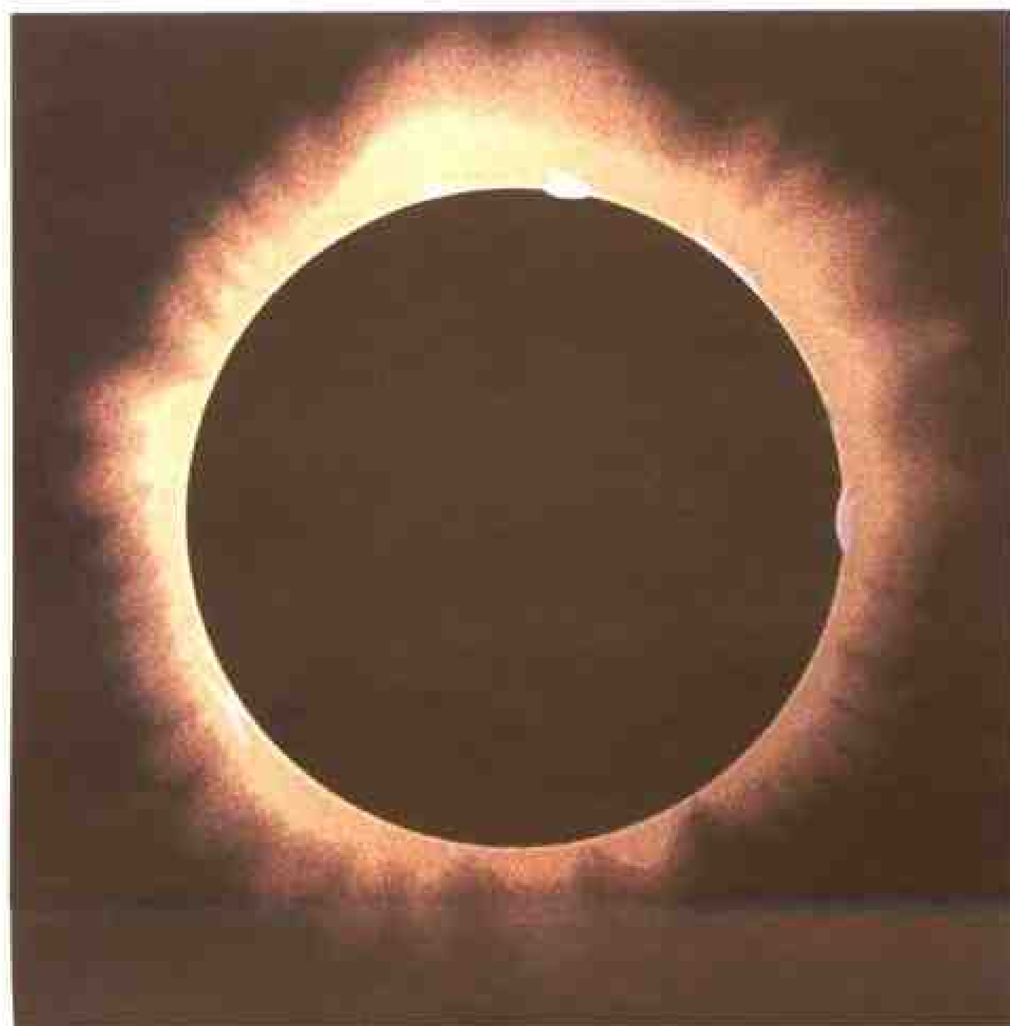
气可能是一些暗淡的微弱的热气体。然而那个时代的物理学知识使得人们很难了解太阳表面的性质。在实验室里，连续的白光光谱来自白热的固体，或者来自一些像熔化的金属等液体。太阳的白光可能就来自这样一个表面。然而在太阳圆面的白光中观测到的许多东西，如太阳黑子、太阳黑子周围相对明亮的一些被称作光斑（小火炬）的区域、还有太阳黑子内部被观测到的细节等等，这些都显示出大气的属性。

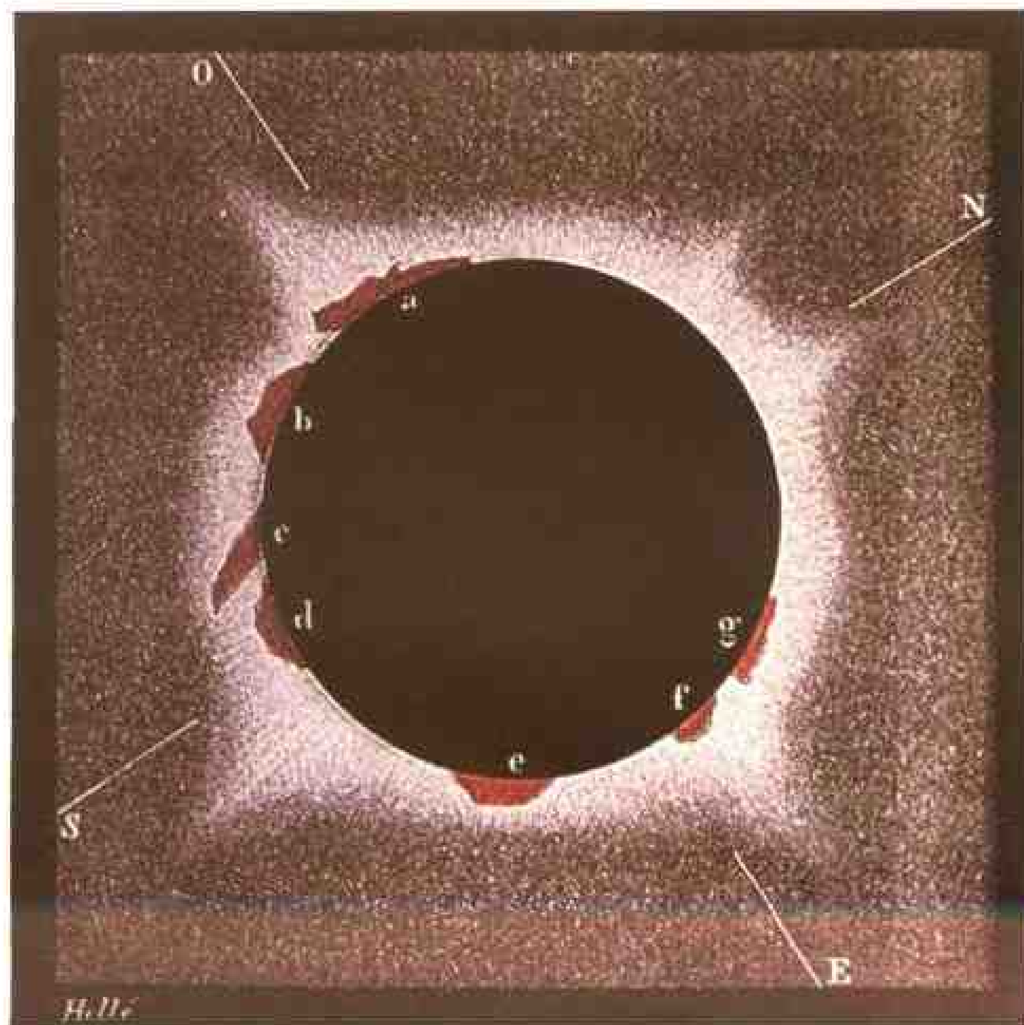


1871 年在斯里兰卡的英国日食观测队。洛克耶(Lockyer)在中间的那架反射望远镜前，左上部的望远镜安装了分光镜。右边的计时器在全食期间按固定的时间间隔报时，以便指导观测者们在仔细计划好的观测过程中不浪费一点宝贵的全食时间（这次日食的时间是 120 秒）。

下左：1869 年 8 月 7 日日食时的日冕照片，由到肯塔基州希比维尔（Shelbyville）的哈佛大学观测队拍摄获得。这是那个年代获得的最好的日冕照片，但是对其下部边缘的日珥曝光有点过度。

下右：同一次日食的日珥照片，经手工着色，见于 1875 年塞奇(Angelo Secchi)发表的一种对日珥的详细描述。





诺曼·洛克耶



法国铸币厂铸造的纪念章，用于纪念儒勒·詹森和诺曼·洛克耶各自独立发现产生人造日食的方法。这种方法使得对色球和日珥进行常规研究成为可能。

约瑟夫·诺曼·洛克耶1836年5月17日出生于英格兰的卢格比（Rugby），是一位外科医生兼药剂师的儿子。1857年他成为一名国防部的职员，并开始把他的空闲时间用于分光镜的研究。尽管他是业余身份，但他在科学上达到的突出地位最终使他在1885年被政府任命为建于伦敦郊区的南肯辛顿太阳物理台台长，他孜孜不倦地为这一具有高度创新性的机构寻求支持。但是令他失望的是在1911年他被转到剑桥。然后洛克耶退休到德文郡居住，在那里他为自己建造了一座私人天文台。

洛克耶在天体物理的许多分支领域都做出了基础性的贡献，他另外的开创性工作包括在1869年创办了《自然》杂志，他编辑该杂志长达50年。1897年他被授予爵位。1920年8月16日在德文郡去世。

这些疑难由于对日全食的观测而得到解决。由于大自然的奇妙巧合，月亮和太阳——前者比地球小得多，后者比地球大得多——正好处于这样一个距离上，从地球上看月亮和太阳在天空中的视大小几乎相等。因为月球绕地球的轨道和地球绕太阳的轨道都是椭圆，月亮和太阳的视大小随着时间而变化，在一个有利条件下，月亮圆面大到足够掩去太阳圆面长达7分钟左右。当日全食临近，天空暗淡下来，在日食的开始阶段，月亮慢慢遮去太阳的外围，月亮可以在太阳圆面上被看到，全食结束时，月亮再次露出太阳。这一美丽的也是使人畏惧的事件在地球表面上的任何固定一处都非常罕见。但是每隔几年，因月亮影子扫过而形成的狭长地带，就会在地球上人迹可至的地方穿过一次。

由于巧合，19世纪下半叶能看到有几次利于观测的日食，那时旅行已经变得容易和便宜了。因此，去观测日食对天文学家来说变得越来越平常。他们携带着日趋精密的仪器，在日食经过的路径上搭建起临时天文台来研究日食的细节，而在这以前，日食只不过是被当做一种奇异景观来对待。

1842年7月8日的日食把几个欧洲国家的天文学家聚集到了欧洲中南部。他

儒勒·詹森

皮埃尔·儒勒·詹森1824年2月22日出生于巴黎，在1852年他完成在巴黎大学的学业之前，由于一次婴儿时代的事故导致的残疾使他不能接受相当的初等教育。大学毕业五年后他被派遣参加了一次科学考察，这是他未来为了科学进行的众多科学考察中的第一次。

1859年古斯塔夫·基尔霍夫解释太阳的化学组成如何由它们的光谱来揭示，这使得詹森决定致力于天体物理的研究。1867年他宣布火星上存在水蒸气。接下来一年他到了印度观测日食，在日食期间他首创了分光镜观测法，可以使太阳日珥在没有日食时被观测到。

1875年法国政府在詹森的劝说下决定在默东建造了一座由国家资助的天体物理天文台，他在该天文台所拍摄的太阳照片是一幅太阳的杰作，记述了从1876年到1903年太阳表面的变化。为了在一个更高的地方观察太阳光线，他攀登到勃朗峰（Mont Blanc）进行观测。他一直是默东天文台的台长，直到他1907年12月23日在那里去世。

们中的大部分以前从来没有看到过日全食。他们全都震惊于围绕太阳的白色日冕的广度和亮度。尤其是对看起来像是从太阳或月亮抛射出来的像山峰一样的三个小凸起（后来定名为日珥），他们以更大的惊奇做了记录，还描述了它们那令人惊奇的颜色——淡紫色。接下来适合观测的日食，只提到了较早、较有意义的几次，它们是1851年在瑞典和挪威、1860年在北美和西班牙和1868年在印度和马来西亚发生的日食。

每一次日食都带来重要的发现。事情变得慢慢明朗，所有重要的现象都发生于太阳大气的不同层面里（没有一项，如曾被怀疑过的发生在所谓的月球大气层里）。在包围整个太阳的较低的延伸层上观测到了暴导的红色火焰，那一层被英国业余天文学家洛克耶在1868年命名为"色球"层。分光镜观测显示，色球层的紫红色产生于几条明亮的发射线，特别是氢的红色发射线（夫琅和费的C线）和蓝色发射线。在1870年的日食中，美国人扬（C. A. Young，1834–1908年）用分光镜做出了至关重要的发现，他发现了更低更薄的"反变层"：在太阳边缘消失的最后几秒钟里，暗线和连续光谱都消失了，两秒钟后，几百条明线闪耀出来，很明显地，这些明线在光谱中的位置就是夫琅和费暗线的位置。

通过这样的观测慢慢地建立起一个非常复杂的太阳外层结构图像，在实验室的实验表明，不单单是固体和液体，气体在高压下也能发射连续谱线。这一发现暗示，所有观测到的来自太阳的光线可能产生于气态的外层。但是疑问始终存在，其中一个奇怪的问题是，用好的望远镜在好的观测条件下，太阳的边缘在高放大倍率下看起来始终是锐利的——人们原指望太阳的边缘会模模糊糊地淡入到空间里。一种真正的解释依赖于对发生在普通恒星外层物理过程非常详细的掌握，而这种掌握要到20世纪才达到：简单地说，从雾状的气态层到透明的上层之间的跃迁非常突然，以致太阳的边缘看起来像是固态的了——而不是像远处太阳光照射

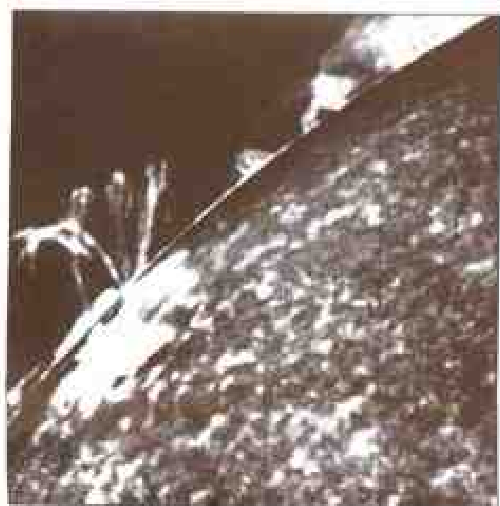
下的雷雨云的边缘那样。

在1868年的日食观测中，法国物理学教授詹森（Jules Janssen，1824－1907年）对日珥光谱中的灿烂亮线留下的印象如此深刻，以至于他突发灵感，想到使用一个高分散力的分光镜（这个分光镜能够发散太阳表层即“光球层”的连续光谱，但不发散单色的亮线），有可能在不发生日食的时候也能看到日珥光谱中的亮线。洛克耶也独立地产生了同样的想法。测试表明这个想法是很有根据的，从此就有可能每天都对色球和日珥进行研究。不久这项工作在一些太阳物理天文台中进行。

人们由此可以在悠闲的状态下，而不是在日食发生的紧张兴奋时刻进行精确的观测，这带来了一项发现，原来被认为是钠的D线的橙色亮线，事实上具有更

各种日珥类型，使用洛克耶和詹森的人造日食方法绘制。这是埃蒂尼·特鲁维劳特（1827—1895年）的工作，他是一位法国自然历史学家和天文学家，在哈佛大学天文台工作过数年。他是前照相时代最富技巧的科学艺术家之一。

一幅1907年的照相画面，展示了一幅太阳圆面的分色照片，在圆面边缘处有一个日珥。



短的波长，无法在任何一个实验室光谱中被确认。它被归结为一种未知的元素，根据希腊语对太阳的叫法，被叫做“氦”（Helium）。这种元素最后由苏格兰化学家拉姆赛（William Ramsay，1852—1916年）于1895年在实验室里离析出来，它是一种放射性矿物质衰变后形成的物质。

日冕光谱中的类似未知明线却不那么好处理，它们被归因于一种未知的“氪”（coronium）元素，但直到1941年才得到解释。最后德国天文学家格罗屯（Water Grotrian，1890－1954年）用理论说明它们实际上跟铁原子有关，这些铁原子处在实验室无法重现的极端高温和极低密度状态下。日冕的性质，在差不多长的一段时间里也是一个谜。现在知道日冕光的来源，一部分是由于包围太阳的一层自由电子大气对太阳光的散射，另一部分则是由位于太阳和地球之间的流星尘埃微粒引起的。

照相术进入天文学

绝大多数新增加的对太阳本质的了解，来自于照相术逐渐增添到了天文学家的研究手段中。确实，对早期非常缓慢和不充分的照相过程来说，非常明亮的太阳确实是一个有吸引力的对象。第一幅用达盖尔法拍摄的日面照片由法国物理学家佛科（J.B.L Foucault，1819—1868年）和斐索（A.H.L Fizeau，1819～1896年）于1845年拍摄于巴黎。1850年英国雕刻家阿切尔（F.S.Archer，1815—1889年）发明了曝光更快的珂珞酊湿片法，他的同胞摄影师兼业余天文学家德拉鲁（Warren De la Rue，1815—1889年）在伦敦附近的基屋（Kew）天文台用特别制造的照相机，使用珂珞酊湿片法拍摄了太阳圆面上的黑子。他的这一工作完成于1858年，只在洪堡宣传施瓦布发现的太阳黑子周期数年之后。从那开始，几乎就立即开始了太阳圆面每日状态的自动记录，一直到1872年，这种记录延伸为一些大的项目，在全球基础上进行了几乎连续的记录，不仅记录光球上的黑子，也记录圆面上面和边上的外层色球。

19世纪70年代，大大改进的干明胶底片被发明出来，它足够灵敏，能够记录太阳的闪光光谱（它只在日全食时延续几秒钟），因此使得能够稍后在实验室里测量这些谱线。更为重要的是，这些底片最后足够灵敏到能够用在夜间的望远镜上来拍摄非常暗弱的恒星和星云（见274页）。



右上图：亨利·德雷珀1880年拍摄的第一张猎户座大星云照片。



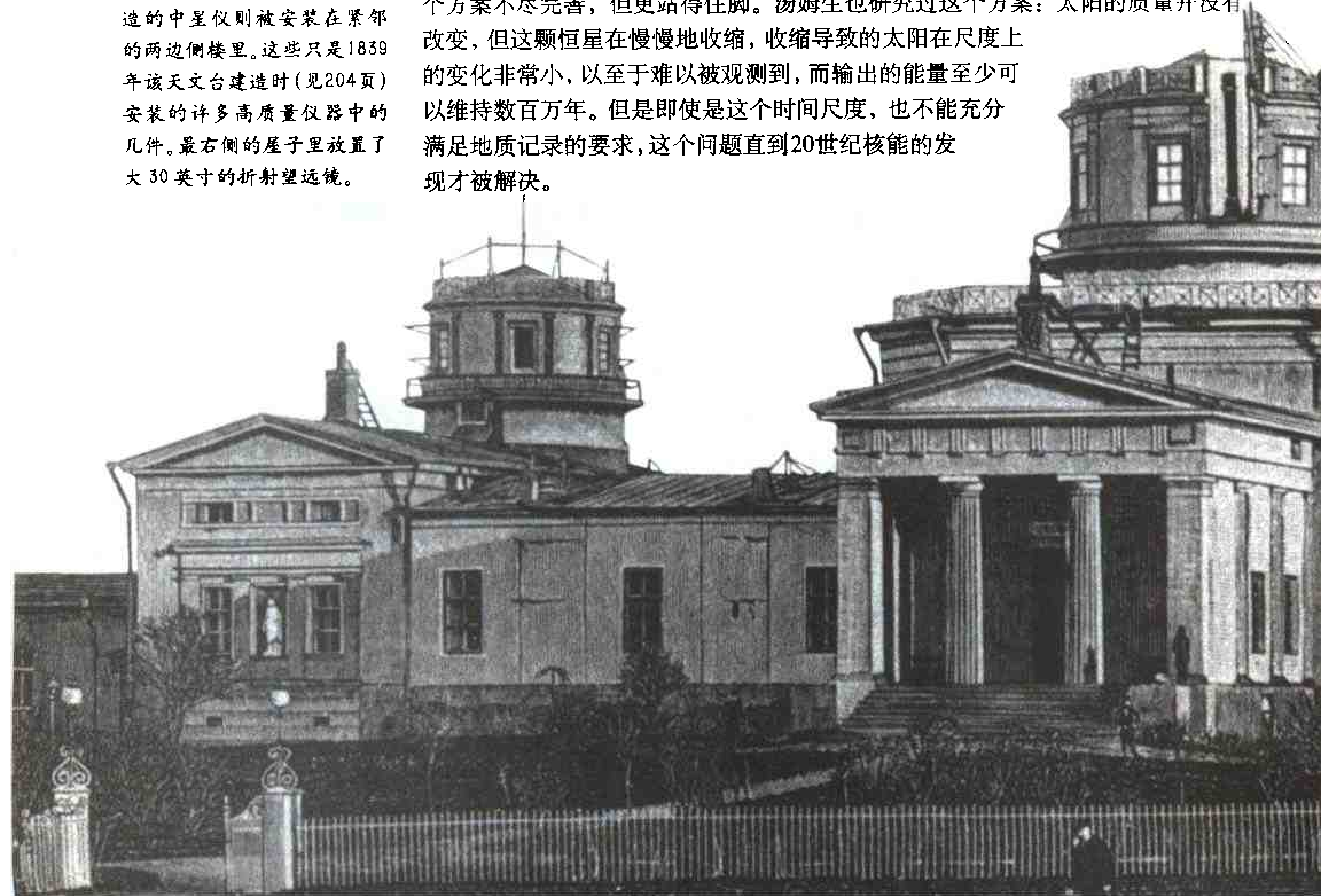
右下图：A.A.卡芒三年后拍摄的该星云照片，显示了照相技术的大跨步前进。

太阳能量的来源

尽管对太阳外层工作原理的认识有所提高，一个更基本的问题还是没有完全解答：太阳向外倾泻这么巨大的光和热，这些能量的源头是什么？到19世纪中叶，一方面由于物理学家的研究成果，另一方面来自工程师们对蒸汽机效率的兴趣，人们对热量和如何测量热量有了很好的掌握。德国物理学家海尔布隆(Heilbronn)的迈耶尔（Julius R. Mayer，1814－1878年）问自己这个太阳能源的来历问题，他计算出，即使假设太阳由炭构成，并有无尽的氧气供应它燃烧，这个太阳炉子也只能烧几千年。他设想了另一种能量来源，来自行星际空间的固体微粒不定地掉到太阳上，跟太阳碰撞时释放出能量。

出生于爱尔兰的物理学家汤姆生（William Thomson，1824－1907年），即后来的开尔文勋爵（Lord Kelvin）证明，这也是站不住脚的。因为即使有足够的物质掉到太阳上，那么它们将改变太阳的质量，而逐渐增大的引力将使一年的长度在几千年里缩短几个星期，显然这一切并没有发生。德国物理学家亥姆霍兹（Hermann von Helmholtz，1821－1894年）在1854年给出了一个解决方案，这个方案不尽完善，但更站得住脚。汤姆生也研究过这个方案：太阳的质量并没有改变，但这颗恒星在慢慢地收缩，收缩导致的太阳在尺度上的变化非常小，以至于难以被观测到，而输出的能量至少可以维持数百万年。但是即使是这个时间尺度，也不能充分满足地质记录的要求，这个问题直到20世纪核能的发现才被解决。

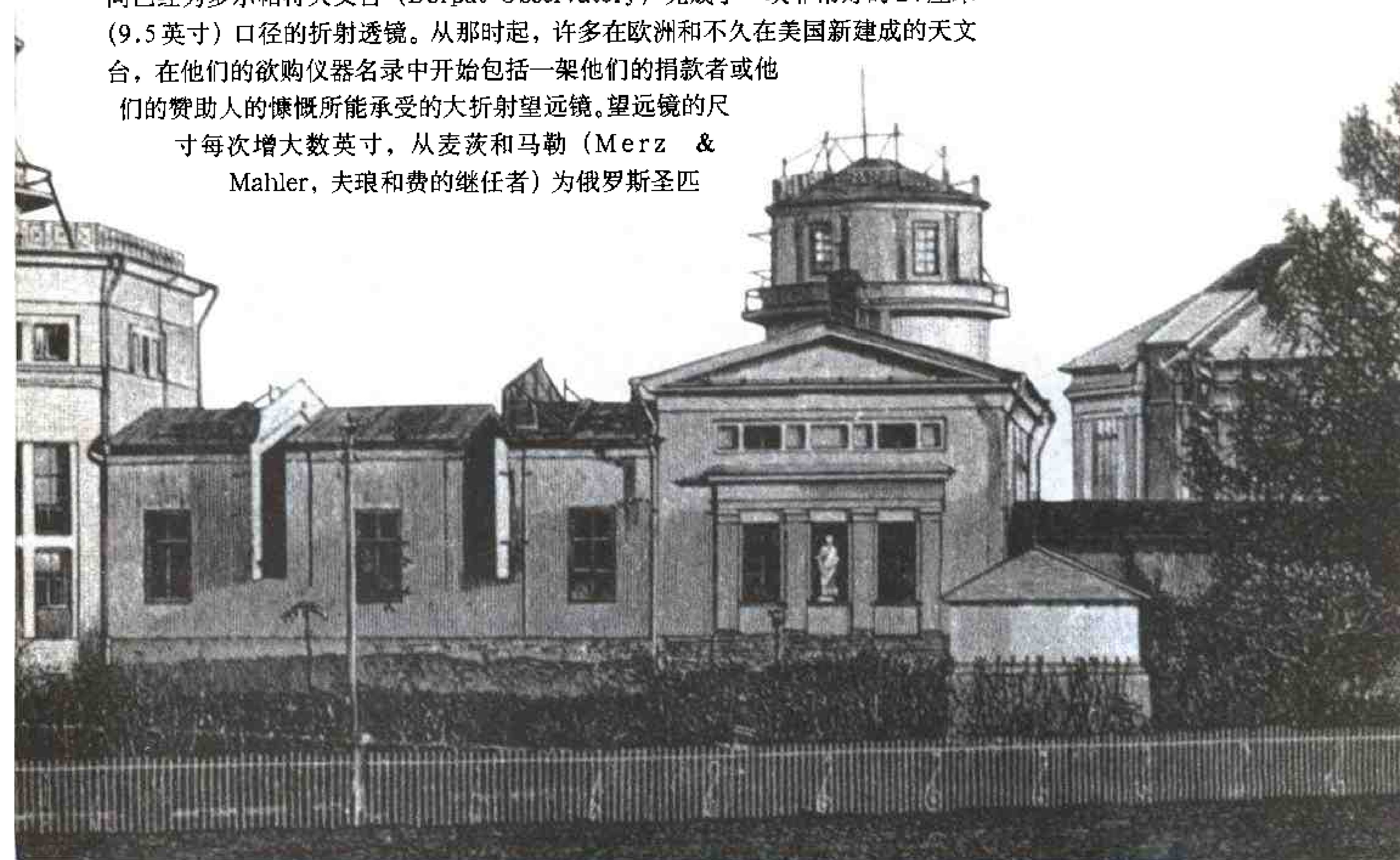
19世纪末期的普尔科沃天文台。中央大圆顶屋安置着慕尼黑的麦茨和马勒制造的15英寸折射镜，而慕尼黑的厄特尔和汉堡的雷普佐尔德制造的中星仪则被安装在紧邻的两边侧楼里。这些只是1839年该天文台建造时（见204页）安装的许多高质量仪器中的几件。最右侧的屋子里放置了大30英寸的折射望远镜。

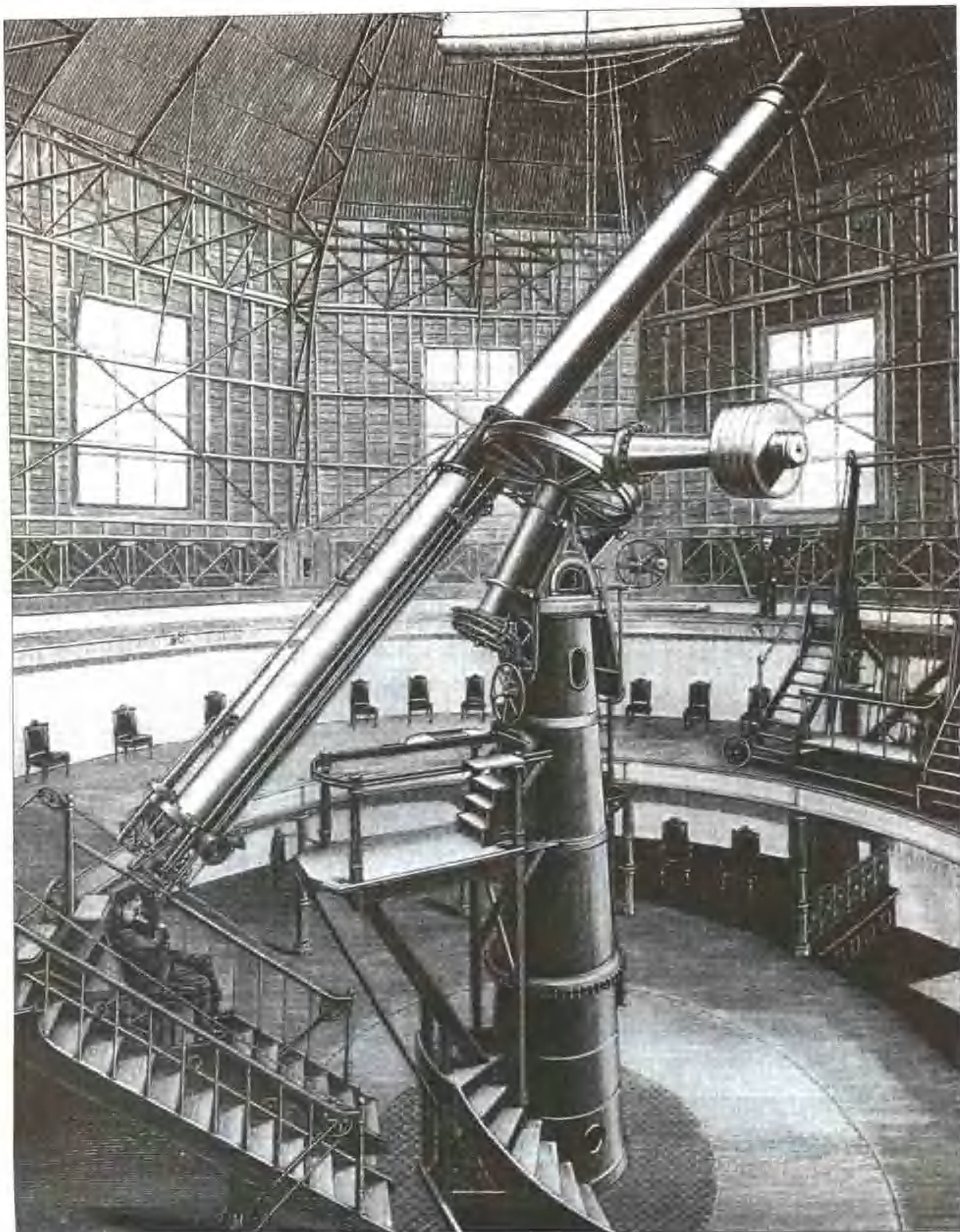


望远镜制造的发展

19世纪早期公立——就是指国立的和大学的——天文台的主要任务仍旧是确定天空中恒星的精确位置，为测量太阳、月亮和行星的视位置提供一个框架。所用的仪器（见161页）是“中星仪”，在大石墩上安装适度大小的折射望远镜，配置上有精确刻度的圈环，以进行必要的角度测量。但是，像威廉·赫歇尔、约翰·赫歇尔、罗斯勋爵和拉塞尔（William Lassell，1799－1880年）这样的业余天文学家需要的望远镜比职业望远镜制造商所能提供的更大。而且，正如我们已经看到的，他们发展了反射望远镜技术，他们使用在他们自己车间里制作的金属发射镜（一种铜与锡的合金）。然而这些望远镜是不稳定的难伺候的仪器。不像玻璃透镜，这些镜子容易失去光泽，为了维护它们，天文学家需要掌握打磨和抛光光学表面的技术。

幸运的是解决方案自己出来了。在光学仪器商们寻求有利可图的新生意的推动下，玻璃制造商们（尤其是瑞典的和后来的法国的玻璃制造商）开始试验制造更大口径、更高质量的望远镜光学玻璃，光学仪器商们也想出了塑造完美的透镜球面的改进方法。如我们所见（204页），在夫琅和费去世的1826年之前，他的车间已经为多尔帕特天文台（Dorpat Observatory）完成了一块非常好的24厘米（9.5英寸）口径的折射透镜。从那时起，许多在欧洲和不久在美国新建成的天文台，在他们的欲购仪器名录中开始包括一架他们的捐款者或他们的赞助人的慷慨所能承受的大折射望远镜。望远镜的尺寸每次增大数英寸，从麦茨和马勒（Merz & Mahler，夫琅和费的继任者）为俄罗斯圣匹





茨堡附近的普尔科沃天文台（Pulkovo Observatory）制造的15英寸折射望远镜和为新近于1847年建立的哈佛大学天文台制造的15英寸双透镜，到1897年芝加哥大学叶凯士天文台（Yerkes Observatory）望远镜的40英寸口径透镜为顶峰。这些大望远镜中的大多数至今还在，但现在它们不再适合现代天文学的大多数需要了，只是作为仪器制造者们精湛工艺的极好样品而被保存。

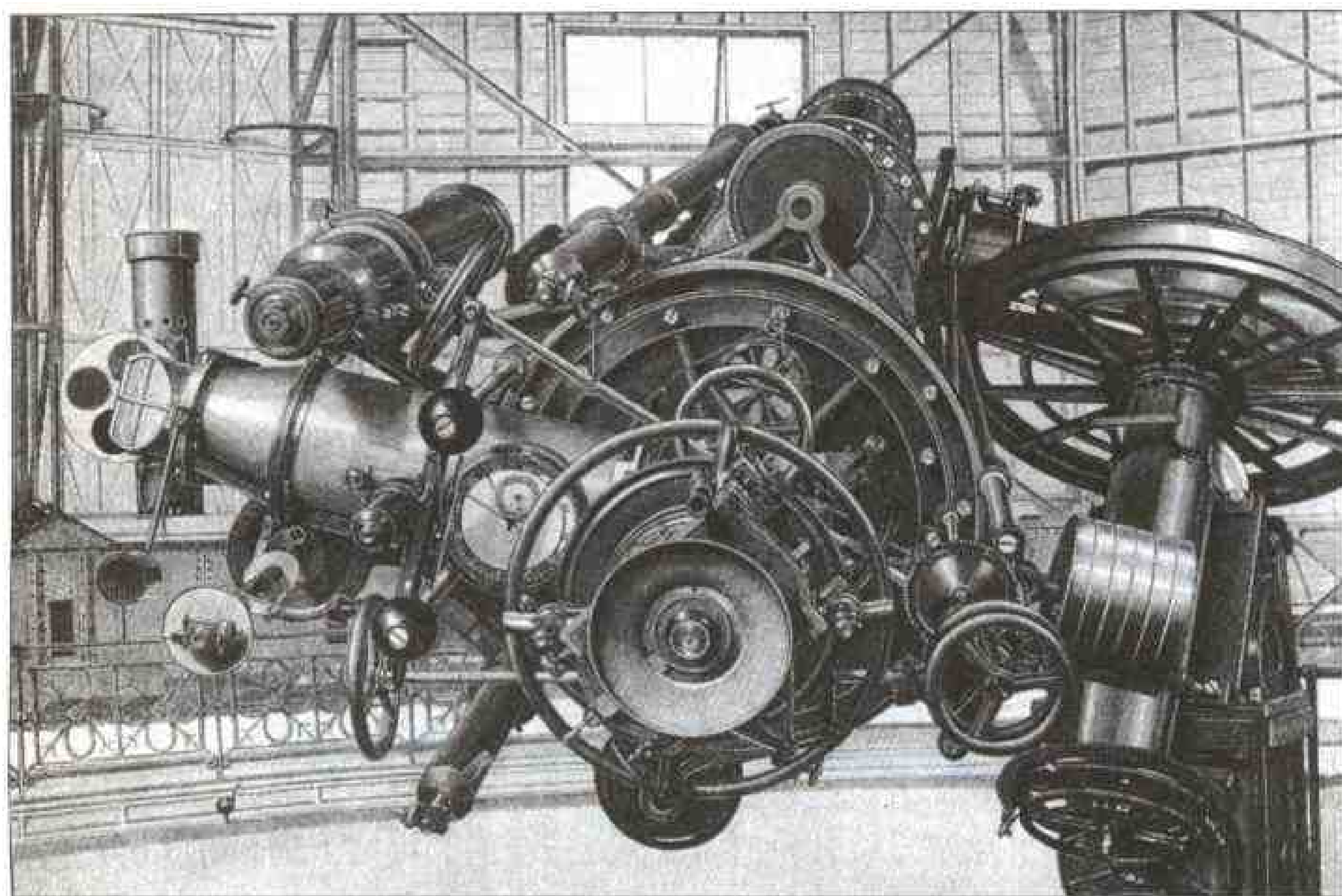
1885年安装在普尔科沃天文台的30英寸折射望远镜。支架系统由汉堡的雷普佐尔德父子建造，光学系统由马萨诸塞州剑桥的阿尔文·克拉克及其诸子建造。这台望远镜在一小段时间里成为世界上最大的折射望远镜。

随着始于19世纪70年代干板过程（dry plate process）的快速发展，照相术进入恒星和行星天文学及太阳物理学时，这些大型折射望远镜不是没有问题的。大的双合透镜（见143页），尽管叫做消色差（无颜色）透镜，但并不能把所有波长聚到一个焦点上。它们是为视觉用途而设计的，在光谱的黄－绿部分形成明晰的像。但是每颗星被未能聚焦的光线形成的彩色晕轮包围，照相图像不够清晰，并且在离透镜不同的距离上，来自一颗恒星的所有光线不能成像到一个位置上，以通过分光镜的窄缝。

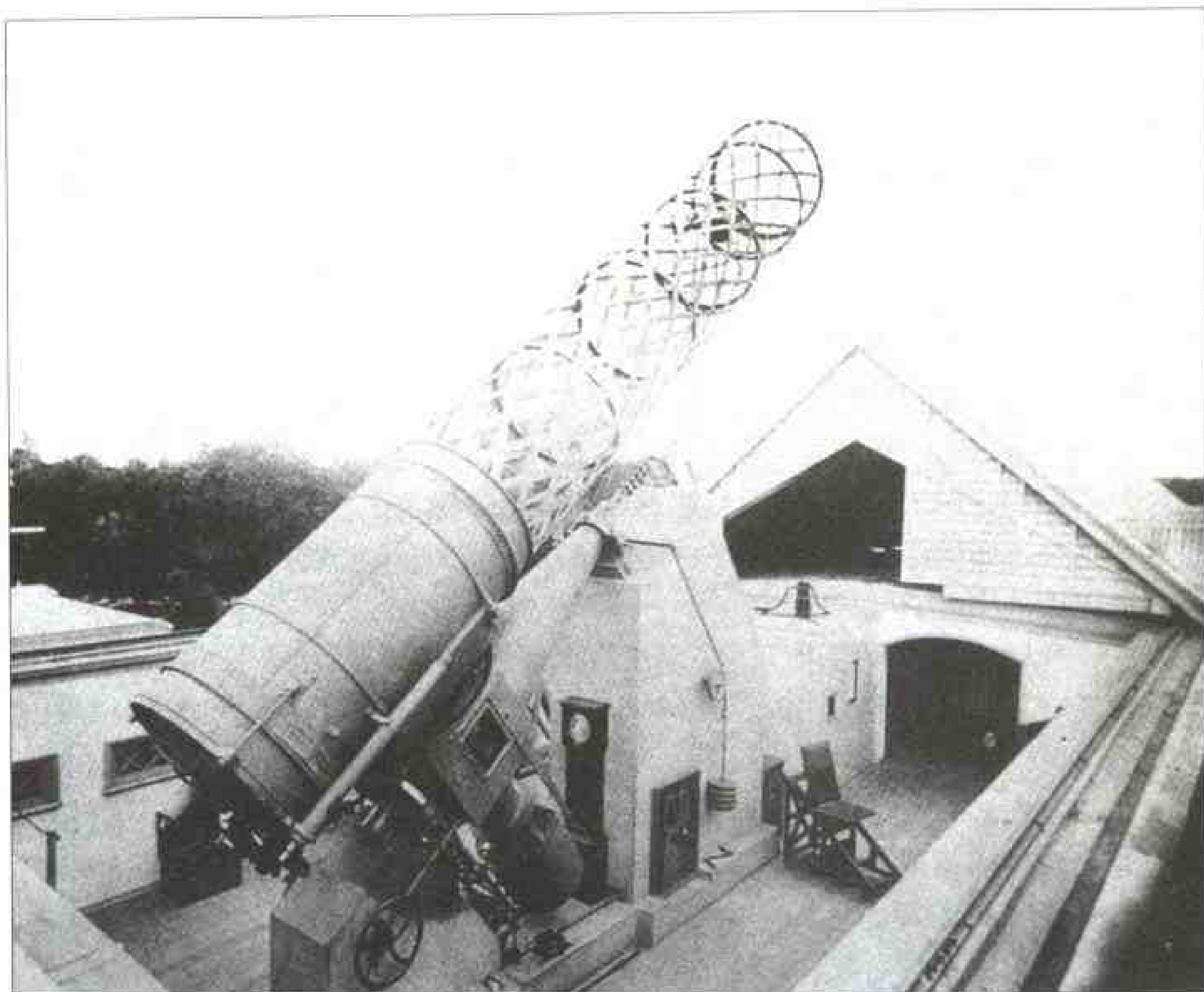
一个化学上的发现提供了一条解决这个问题的出路。大约在1853年德国化学家李比希（Justus von Liebig，1803－1873年）发明了一种流程，通过硝酸银的水溶液，可以在一块干净的玻璃板表面上镀上一层非常薄的金属银，慕尼黑的斯坦黑尔（K.A.Steinheil）和巴黎的佛科用这种方法制造了最早的反射望远镜，主镜不是用传统的镜用金属制成，而是用在前面反光的一面镀上银的玻璃制成。

开始人们带着疑虑看待这个发明：银薄膜不仅容易碎裂而且很快失去光泽，但是它的反射率变得更大，并且化学过程不影响透镜的光学形状。玻璃比镜用金属容易成形，它也不需要很高的质量，因为光线并不透过玻璃，而且只有一个光学表面需要成形，而消色差透镜至少有四个表面需要成形。

最后一架大型金属反射镜望远镜是由都柏林一家公司的托马斯·格罗布（Thomas Grubb）在19世纪60年代为墨尔本天文台制造的48英寸反射望远镜。



普尔科沃天文台30英寸折射望远镜的目镜端。复杂的控制装置是为了观测者便于设定、聚焦、微调和记录。对这样一种望远镜的管理也达到了一个新的复杂水平。



墨尔本天文台反射镜，这也是天文仪器上最大的不幸事件之一。1865年，为了让新建立的墨尔本天文台能够研究南天的星云，与都柏林的格罗布签订了一架大反射望远镜的订单。1869年这架望远镜被安装起来，但支架系统不能令人满意。更糟糕的是，当它的反射镜失去光泽后，在澳大利亚没有一个光学仪器商有能力为它重新修磨。这是最后一块用金属镜制成的反射镜。

事实证明，要使这架望远镜维持好的工作状态很困难，所以此后玻璃镀银反射镜成了天文照相和分光镜仪器的首选。一位英国业余爱好者于1895年捐赠给加利福尼亚利克天文台（Lick Observatory）的格罗斯利（Crossley）36英寸反射式望远镜，首次展示了此类望远镜在星云照相观测中的能力，而洛杉矶附近的威尔逊山天文台（Mount Wilson Observatory）的60英寸反射望远镜（1908年投入使用）和100英寸反射望远镜（1917年）确立了此类望远镜在20世纪天体物理学研究中的优势地位。

太阳系研究

在对双星进行精确观测（见204—205页）的同时，19世纪晚期的大型折射望远镜也被很好地用到对太阳系内天体的物理性质的研究中。碰巧，这个时期可见的壮观亮彗星出现的数目比一般时期都多。

彗星：头和尾

彗星的性质一直是个谜团，现在观测彗星的望远镜也充满神秘色彩。一些大彗星，即使是偶然的观测者也能看到，它们非常引人注目，几天甚至几个星期横贯在夜空中，它们几乎都是绕日轨道周期为几千年的长周期彗星。所以它们没有

先前出现过的记录，它们的出现也是不可预测的。在1811年到1843年间出现过这样的彗星，但至少有一颗彗星与这些彗星等量齐观，它首先由佛罗伦萨天文学家多纳提（Giovan Battista Donati，1826 – 1873年）在1858年6月初用望远镜观测到。在随后数周内，随着它靠近太阳，到9月份它的亮度达到可以让肉眼看见，到10月初它的头部比附近的大角星（Arcturus）还要亮，它的尾巴横穿三分之一的天空。北半球的许多天文台对它进行了很好的定位和精致的观测。

对于其他亮彗星而言，彗星的尾和头具有复杂的结构，它们每天甚至每小时



1858年多纳提彗星的彗头图，哈佛大学G．P．邦德（Bond）于9月29日绘制。这颗彗星由欧洲和美洲的天文台精确地定出了在天空中的位置。当时仍旧不得不用肉眼观测这颗彗星，但是普尔科沃天文台和哈佛大学天文台已经有了口径为15英寸的望远镜，哈佛大学天文台在1862年出版了一册362页专门描述这颗彗星的书，书中附了许多精确的雕版画。这些富于技巧的绘画对于理解彗星物质与太阳辐射、行星际物质之间的相互作用来说仍旧具有价值

都在发生变化。彗星有一条直的尾巴，背着太阳的方向伸展，另外还有一些多多少少有点弯曲的尾巴。奥伯斯（H.W.M Olbers）于1812年提出这些在头部和尾部的弯曲形状，是彗星靠近太阳时彗头所喷射出来的物质沿着不同的轨道被抛离太阳而形成的，这依赖于喷射的速度、彗星在空间的轨道和作用到微粒上的力等

一幅多纳提彗星的平版印刷画，彗星横越在巴黎的桥上方。这更像一幅艺术作品而不是一项科学记录，它是A.吉勒明1875年出版的《彗星》一书的卷首插图，是保存下来的肉眼可见大彗星的最好画像之一。它具有科学上的精确性：彗头附近的亮星是大角星，彗尾的几个构成部分也被准确地画出来了。

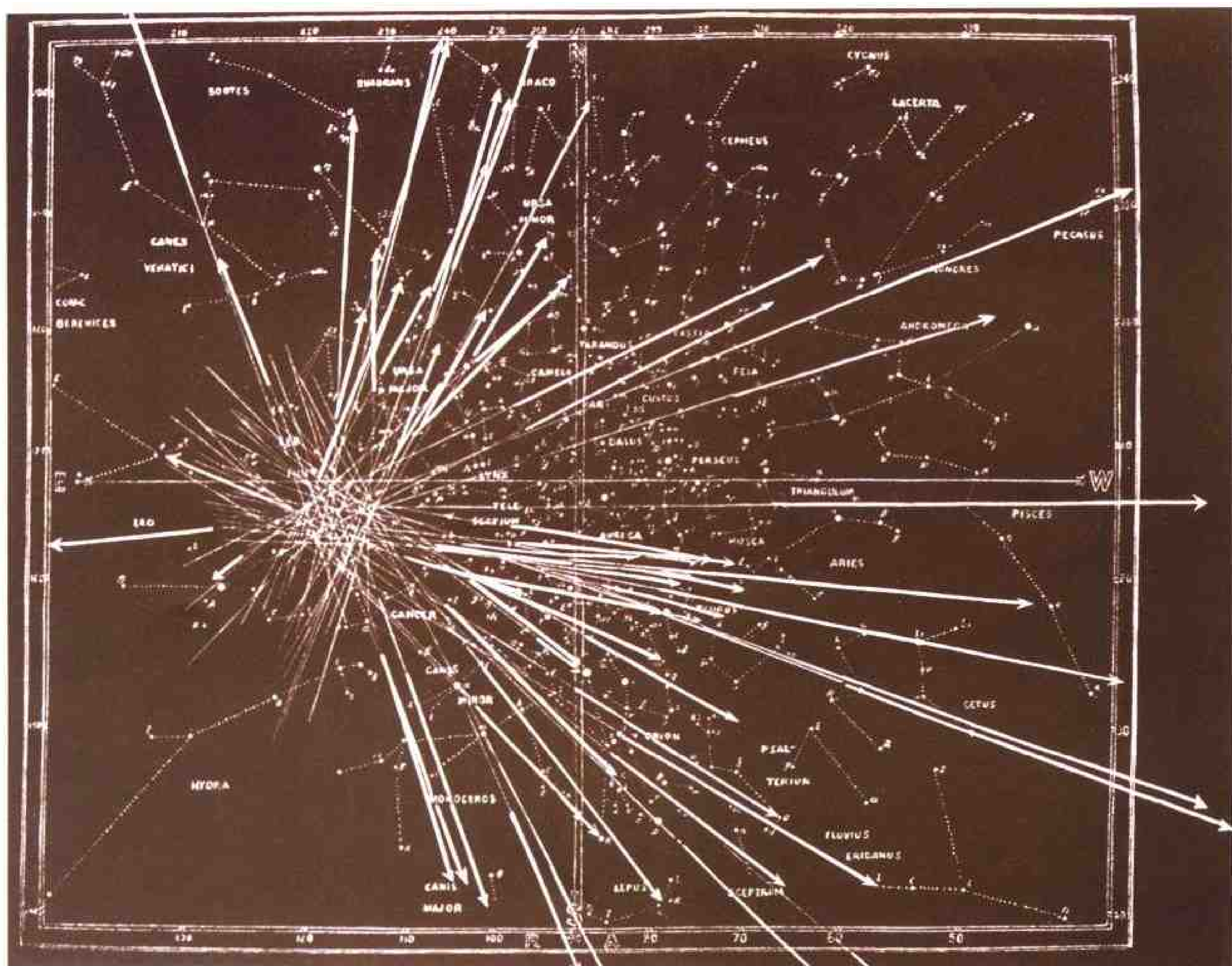




1848年恩克彗星图，通过英格兰白金汉郡约翰·李的私人天文台上的5.9英寸折射镜看到。许多彗星是不那么壮观的，有许多不用望远镜看不见。恩克彗星的头被描绘成有一个看起来像恒星一样的核。彗核淡入更暗的彗发中，彗发又进一步溶入暗淡的夜空中。这颗彗星没有彗尾。

因素。

亮彗星的头足够明亮了，可以用分光镜来检测彗头的光线。1864年8月5日，多纳提观测一颗二等亮度的彗星时，首次对彗星进行了分光观测。人们一度认为，彗星通过反射太阳光而发光，所以它跟太阳一样具有夫琅和费光谱。多纳提作出了重要的发现：有三条被较宽的暗带分割开来的明亮带，这预示着一些光线来自彗星本身的未知性质的发热气体。随后几年出现的亮彗星和在望远镜上及实验室里对分光镜的更多使用，相当多地增加了人们有关彗星性质的知识。到1880年，人们普遍认为，彗头的光线部分来自对太阳光的反射，但主要是宽带发射线（跟窄的亮线截然不同），可以在实验室通过对混合了二氧化碳和简单碳氢化合物如甲烷、乙烯等气体的管子进行放电，来激发这些宽带发射线。当时的有机化学不足以确切理解这些光线如何产生，只有到了20世纪人们才明白，宽带产生于一些原子的简单组合——碳、氮、氢的不同组合，而这些组合在地球环境里是不稳定的。然而当时的这点有机化学知识却足够用来在公共传媒上唤起人们的警觉，当时获悉1910年地球将穿过哈雷彗星的尾巴，而彗星尾巴里可能含有剧毒的碳、氮的氰化物。



1866年11月13日夜晚大流星雨期间在格林威治所见的亮流星轨迹 所有轨迹起始于狮子座。查找历史记录可知，类似的流星雨早在902年10月13日（儒略历）就出现过，这里显示的三个星期的位移，根据J.C.亚当斯的计算，是由于行星的摄动引起的

流星

19世纪60年代晚期，人们对彗星的不断增加的兴趣被1866年11月13日、14日夜间大部分欧洲地区可见的显著流星雨推向高潮，在接连几个小时里，流星数目难以计数。11月份的流星雨也叫做狮子座流星雨，流星的轨迹看上去像是从狮子座辐射开来。狮子座流星雨早就为人们所知，同样的壮观大象在1799年和1833年的大致同一天也发生过。尽管不是按照一个简单的间隔暴发，有规律地出现的8月份英仙座流星雨和4月下旬天琴座流星雨也为大家所熟知。

几位天文学家认识到，辐射点的位置，结合最大活动年的日期，提供了流星微粒在太阳系里所走轨道的精确信息。剑桥大学的亚当斯（John Couch Adams）循着耶鲁大学牛顿（Hubert A. Newton）的工作，计算出了11月份流星体的惟一轨道，其他天文学家也同样计算出了8月份英仙座和4月天琴座流星体的轨道。这些结果确认了米兰人斯契亚巴勒里（G.V. Schiaparelli，1835-1910年）的一个预见，流星体在空间的轨道跟一些彗星的轨道很相似。没有过多久，人们确认

了英仙座流星雨的轨道是1862年亮彗星的轨道，狮子座流星雨的轨道是1866年坦普尔彗星的轨道，而天琴座流星雨轨道则是1861年彗星的轨道。

太阳系众多极小成员——彗星、小行星、流星以及较大的穿过大气层掉到地球表面的陨星——之间的物理联系很久都没有得到解释。人们慢慢认识到，并不像一度期望的那样，陨星会在大群流星雨出现时掉到地上，它可能跟小行星的关系更紧密。但是19世纪下半叶的研究，为稍后的有关太阳系本身历史的概念奠定了基础。

海王星、天王星和火星的卫星

在这个世纪的后期，功能不断加强的望远镜被安装到更好的观测位置上，逐渐地增加了太阳系已知成员的数目。新近被发现的海王星的卫星，仅仅在对海王星首次观测17天后，就被利物浦业余天文爱好者拉塞尔（William Lassell）找到。一旦确定卫星绕海王星旋转的轨道，这就给出了新行星的质量，也就是给出了它的密度。稍后，在1851年，拉塞尔给天王星增加了两颗卫星天卫一（Ariel）、天卫二（Umbriel），它们比更亮的天卫三（Titania）和天卫四（Oberon）更靠近天王星。而天卫三和天卫四与天王星一起由威廉·赫歇尔发现。

1877年火星比平时靠地球更近。直到那时，人们还不知道火星有卫星。但是

G.V. 斯契亚巴勒里

齐奥瓦尼·温琴尼奥·斯契亚巴勒里1835年3月14日出生于皮德蒙特（Piedmont）萨维利亚诺（Savigliano），毕业于都灵（Turin）大学之后，他跟随J.F.恩克在柏林学习天文学，接着在普尔科沃天文台待了一小段时间，然后在1860年加入了米兰布雷拉天文台的研究行列，两年后成为该天文台台长。

斯契亚巴勒里的早期研究，局限于布雷拉天文台的小型仪器，主要研究彗星和流星。1877年之后，当他的配置中有了一架麦茨的折射镜之后，他的主要研究对象则是行星，尤其是火星。1900年他自愿退休，有了更多闲暇，他对古代和伊斯兰天文学史的研究做出了重要的贡献。1910年7月4日在米兰去世。



土星的光环

一幅土星绘图，哈佛大学天文台埃蒂尼·特鲁维劳特（见256页）绘制于1872年。这是哈佛大学1877年出版的一系列最好的行星绘画中的一幅。即使在19世纪70年代照相术有了快速发展之后，人眼仍旧是记录望远镜里行星微小细节的最好办法，直到一个世纪后行星际飞行器和太空望远镜发展起来之前，情况一直如此。

自从17世纪中期土星光环——在太空时代之前这一直是太阳系中惟一的环状系统——被认识到之后，它的物理本质一直迷惑着天文学家。作为一种视觉奇观因而无疑是天空中最著名的天体，土星自然成为新投入运营的望远镜的研究对象，观测者们用他们增强了的光学能力来寻找不可捉摸的细节。1850年，哈佛大学的威廉·克兰奇·邦德（1789–1859年）用15英寸折射镜发现了暗弱的内侧C环，数天后英国的W.R.多兹也独立地看到了它。威廉的儿子乔治·菲力普·邦德（1825–1865年）猜想土星环的特征在缓慢变化，并认为这些环一定是流体状的而不是固体的。

一个重要的进展由年青的苏格兰数学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（1831–1879年）在1857年给出。此前剑桥大学为土星光环问题设立了一个论文奖，麦克斯韦在他的论文中令人信服地证明固态和液态的环都不可能存在，这些环是由数百万块小物体组成，每一块各自沿着在行星赤道面内的轨道上运行。他从数学理论得出的推论解释了极大多数已知的观测事实，并立刻被人们接受了——尽管麦克斯韦理论所要求的关键证据，即土星光环的外侧比内侧运动得更慢，直到1895年才由匹茨堡阿里格尼天文台的詹姆斯·E·凯勒观测到。

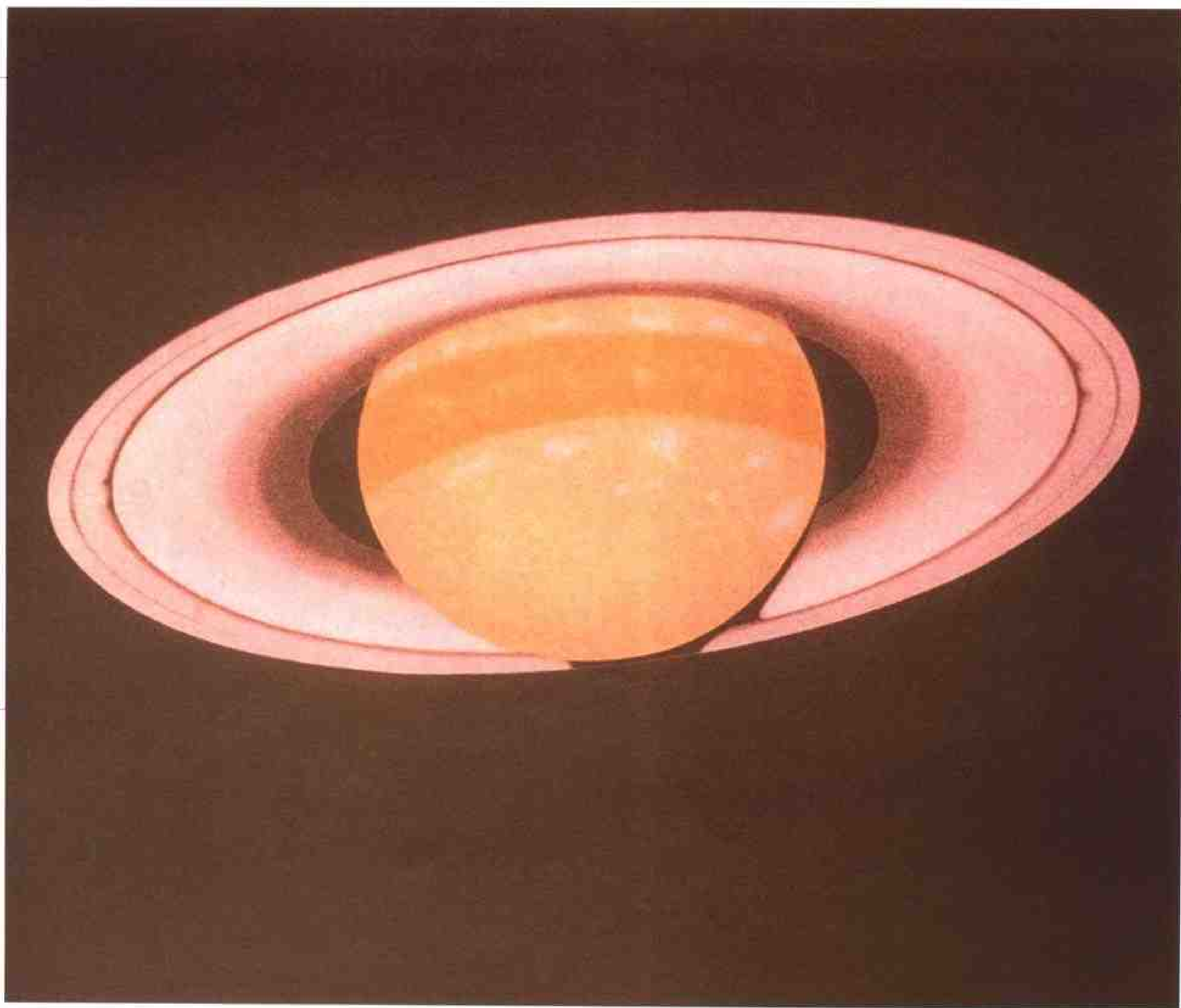
霍尔（Asaph Hall，1829 – 1907年）用华盛顿特区海军天文台的26英寸折射望远镜搜寻，发现了紧靠火星的两个暗淡卫星（Deimos和Phobos），靠里边的那颗离火星太近了，以至于它的轨道周期比火星的自转周期还要短。这是惟一的情形，新发现的卫星不仅提供了精确的火星质量，而且在尺度上也被认为更像是较小的流星而不是其他更大行星的卫星。

火星“运河”

火星本身也引起了人们的兴趣。早在1783年威廉·赫歇尔已经指出，火星是跟地球最相像的行星，到19世纪中期，人们普遍认为，火星比地球小但有跟地球非常接近的自转周期，自转轴也跟地球的差不多一样地倾斜于太阳系的公转面。它有白色的极冠，随着火星季节变化，有强弱不同的永久性表面斑纹，其中一些斑纹可以在绘制于17世纪的首张望远镜火星圆面图上被找到。

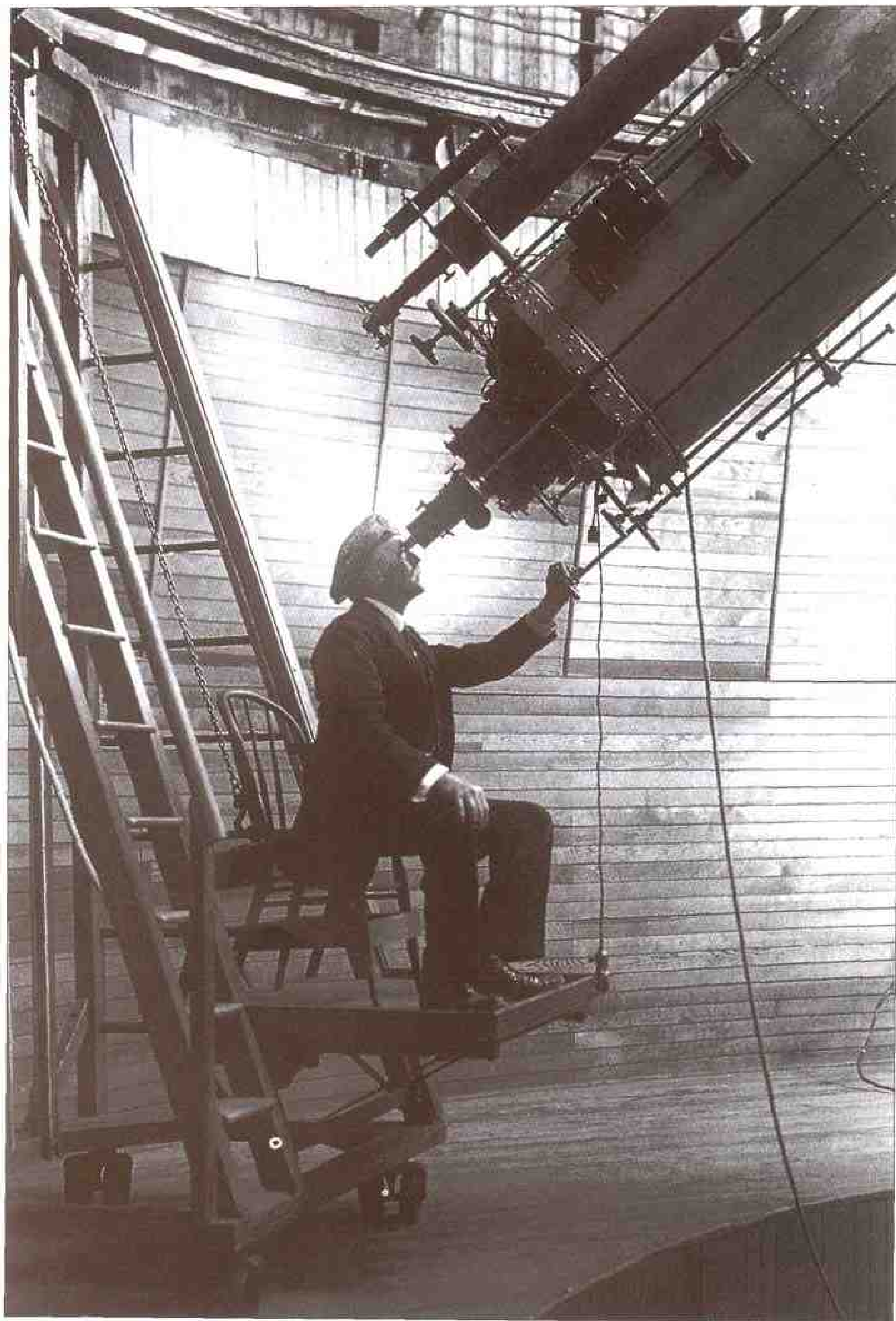
1870年以后，职业天文学家和业余天文学家都开始对这些斑纹产生兴趣。既要有好的望远镜，还需要有稳定的大气，外加观测者的耐心。在一些年份里，火星并不在合适观测的位置上，离地球最近的时刻每15年才来一次。即使在离地球最近时，火星圆面也小于满月视直径的七十分之一。

在1877年火星接近地球时，斯契亚巴勒里着手绘制火星表面图。他记录下那些暗色的斑纹（被想象成是海洋）是数百条纤细的刚刚能被分辨的暗线的源头，这些暗线穿过较为明亮的橙色（大陆?）区域。他把它们叫做“沟道”（canali，



channels)，并声称这些不过是天然的地形学上的特征。

他无意中把行星天文学置于一场最充满好奇的争辩之中。这场争辩直到一个世纪后才解决。刚开始，一些天文学家拥有的望远镜比斯契亚巴勒里的更大，他们能看到沟道，而另外一些天文学家则不能看到。"沟道"(Canali，channels)一词被错误地译成英文"运河"(canals)，暗示是一种源于智慧生物的人工构造，一个必然的推论就是火星上有智慧生命。争辩吸引了波士顿的洛韦尔（Percival Lowell，1855－1916年）的注意，他是一个有财有势的新英格兰家族的成员。1894年，火星正在接近有利于观测的大冲位置，洛韦尔放下了手中的大部分生意，着手建立一个装备良好的私人天文台，台址选在利于观测的亚利桑那旗杆镇(Flagstaff)附近。后来，作为观测的结果，他完成《火星和它的运河》(Mars and its Canals，1906年）和《作为生命居所的火星》(Mars as the Abode of Life,



1896年珀斯沃·洛韦尔正在白天用建造在洛韦尔天文台的24英寸克拉克折射望远镜观测金星。洛韦尔于1855年出生于波士顿一个望族。1876年毕业于哈佛大学之后，他投身于生意和旅行、但在19世纪90年代，他增加了对天文学的兴趣。1894年他在亚利桑那旗杆镇选了一块高地作为观测地点，在那里安装了望远镜；不久他确信火星上存在着智慧生命，并极力宣传他的观点。后来他计算一颗未被发现但据信存在于海王星（当时知道的最远行星）之外的行星的位置。天文台研究人员付出了大量努力在寻找这颗"X行星"，但是直到1916年11月12日洛韦尔在旗杆镇去世时，"X行星"仍旧没有被找到

1908年）两书，书名所表达的意思，正是洛韦尔的信念。

洛韦尔错了：火星上没有人工的运河。但是从更广泛的意义来说，他的工作有深远的影响：他的天文台做出了其他一些发现，展示了好的仪器选择有利观测地点的重要性；他天文台继续对行星研究保持着兴趣（例如，在1930年导致了冥

1930年冥王星的发现

珀斯沃·洛韦尔相信美国人T.C.钱伯林（Chamberlin，1843—1928年）和F.R.摩尔顿（Moulton，1872—1952年）在1904年提出的星子假说，根据该假说，一颗路过的恒星从太阳拉出一团物质或者叫星子，所有行星就从这团物质形成而来。洛韦尔认为，一方面推测它的周期，一方面根据它吸引太阳系已知天体所应有的效应，他能够算出这颗尚未被发现的紧邻海王星的X行星在何处。洛韦尔天文台为寻找这颗X行星付出很多努力，在1916年洛韦尔去世之后还继续在寻找。最后，在1930年，这颗现在叫做冥王星的行星被该台的克莱德·威廉·汤保（Clyde William Tombaugh，1906—）找到了。现在我们明白洛韦尔的预测在科学上是不正确的，只是机缘巧合帮助了冥王星的发现。



1930年1月23日汤保拍摄的双子座天区。

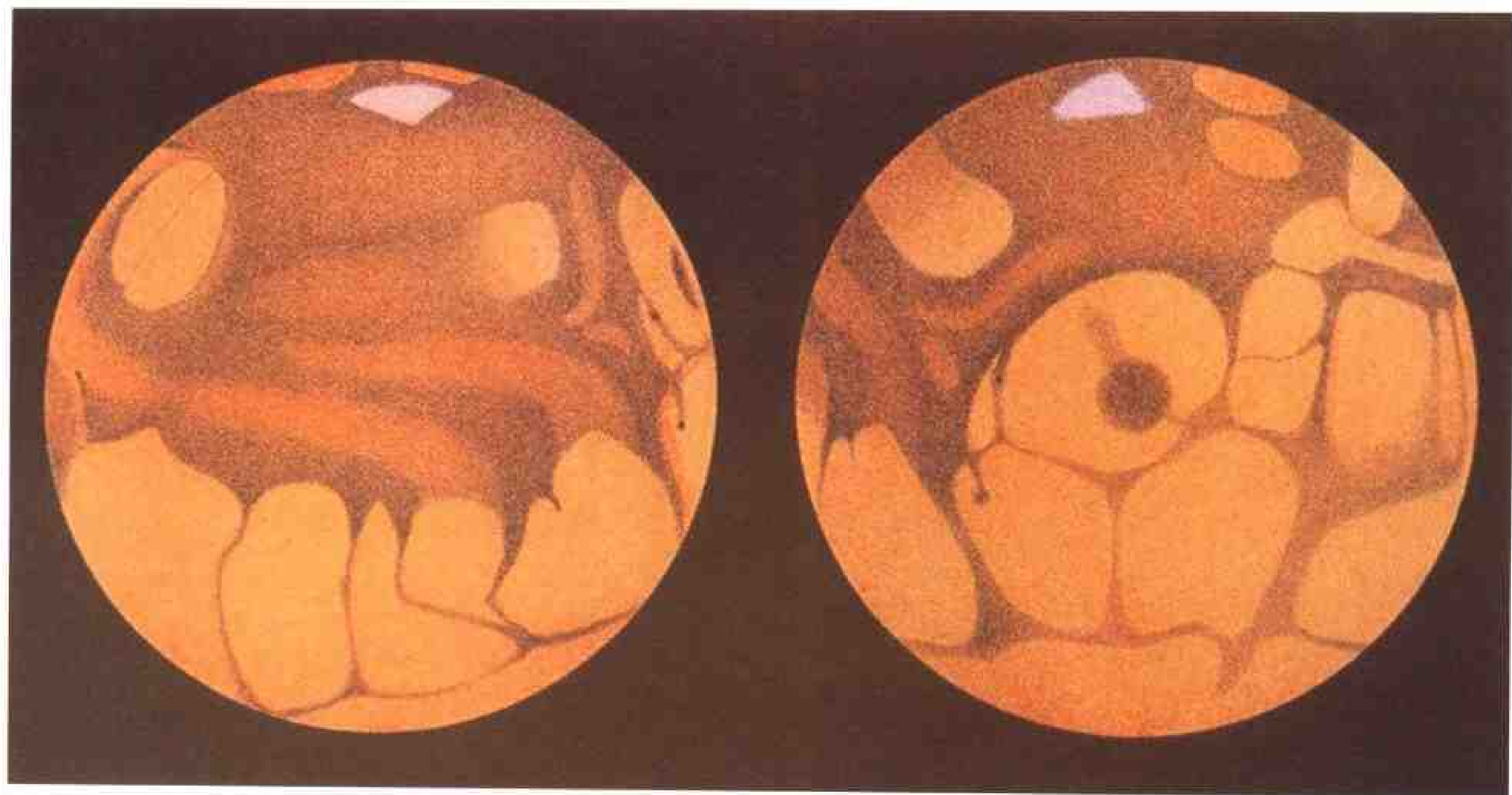


6天后的同一天区。1月18日用闪视镜（见308页）比较两张底片时，汤保注意到第二张底片上的一个天体（箭头所指）从第一张底片拍摄时起移动了位置。这就是X行星。

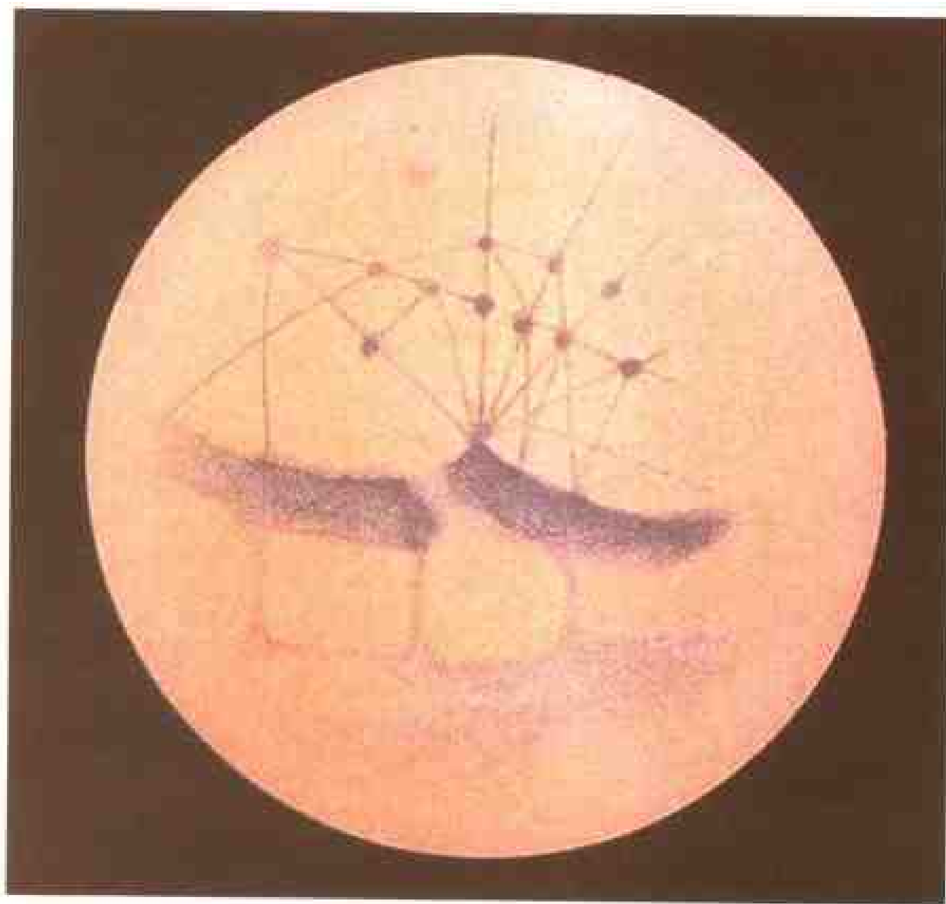
王星从那里被发现；还有我们稍后会看到，该天文台对20世纪的观测宇宙学也做出了重要贡献。

恒星和星云

原子光谱学知识的增加和对来自行星表面反射的偏正光测量方法的改进，带来20世纪早期对行星物理学的深入研究。那些研究发现大行星大气中含有甲烷，



1877年9月当火星接近地球时、G.V. 斯契亚巴勒里绘制的火星表面的两种外貌. 天然的沟道被认为是从深色的海洋开始穿过橙色的区域。



珀斯沃·洛韦尔在1894年或1895年绘制的火星图，当时火星大冲，最适合观测。洛韦尔相信火星上的智慧生物面临水短缺，他们会在这颗行星上引水灌溉。他因此画出了人工的运河，而不是斯契亚巴勒里的天然沟道。

并在木星和土星中的大气中发现了氨。但是天体物理学研究的兴趣更多地转向了恒星和星云这些更激动人心的问题。除了很少数的例外，对行星的观测停止了。部分原因是因为很难看到能够进一步做什么，还有部分原因是作为火星辩论的一个结果，对行星那引人着迷的变换不定的表面特征的研究，像火星和木星的，出于一种默契，都留给了业余天文学家。





19世纪80年代绘制的两幅木星图画。

上左图：1885年一名业余天文学家N.E.格林在马德拉群岛用18英寸反射望远镜观测木星时绘制的木星图。

上右图：1889年，J.E.凯勒用利克天文台的36英寸折射望远镜在做的一次专业观测时绘制的木星图。格林的绘图质量是那个时期业余天文学家对行星研究所达到的高水平的见证。

19世纪晚期照相术的影响

我们已经看到分光术和照相术的运用如何迅速地增加了我们对太阳的了解。对恒星和星云也是如此，只是时间稍微晚了一点而已。即使是一颗很亮恒星的有限星光通过光谱仪的窄缝，然后通过三棱镜发散成光谱，裸眼也几乎看不见它。它太暗弱了，以致不能被记录在早期的照相底片上。1872年，纽约天文学家亨利·德雷珀（Henry Draper，1837－1882年）成功地拍摄了亮星织女星的光谱。1879年伦敦业余天文学家威廉·哈京斯（William Huggins，1824－1910年）拍摄了其他几颗恒星的光谱，把记录的光谱从紫光区扩展到紫外区，照相感光剂对该区域敏感，而人眼则不敏感。大约1880年以后，新发明的干板技术一年比一年提高，制造商们彼此竞争，为肖像和风景的摄影提供更好的产品以快速扩大生意，这一切增加了恒星光谱照相的可能性。

对1882年大彗星的照相观测无疑是一次关键的事件，这颗彗星于该年9月出现，宜于在南半球观测。在好望角天文台的苏格兰天文学家大卫·吉尔（David Gill，1843－1914年）急切地想获得一张横贯天空的彗尾照片，于是他向当地一位



大卫·吉尔拍摄的1882年大彗星的照片。可见的恒星（直到10等）使得吉尔和其他人确信通过照相绘制星图的价值。

肖像摄影师寻求帮助。一架照相室相机被绑到一架望远镜的一端，然后望远镜跟踪彗星曝光。吉尔被结果震惊了，照片不仅展示了壮观的彗星图像，同时也在一块照相底片上显示很大一块天空和几千颗恒星的图像，而如果用老的目视方法观测和记录这些恒星，要花去数个星期的夜晚。

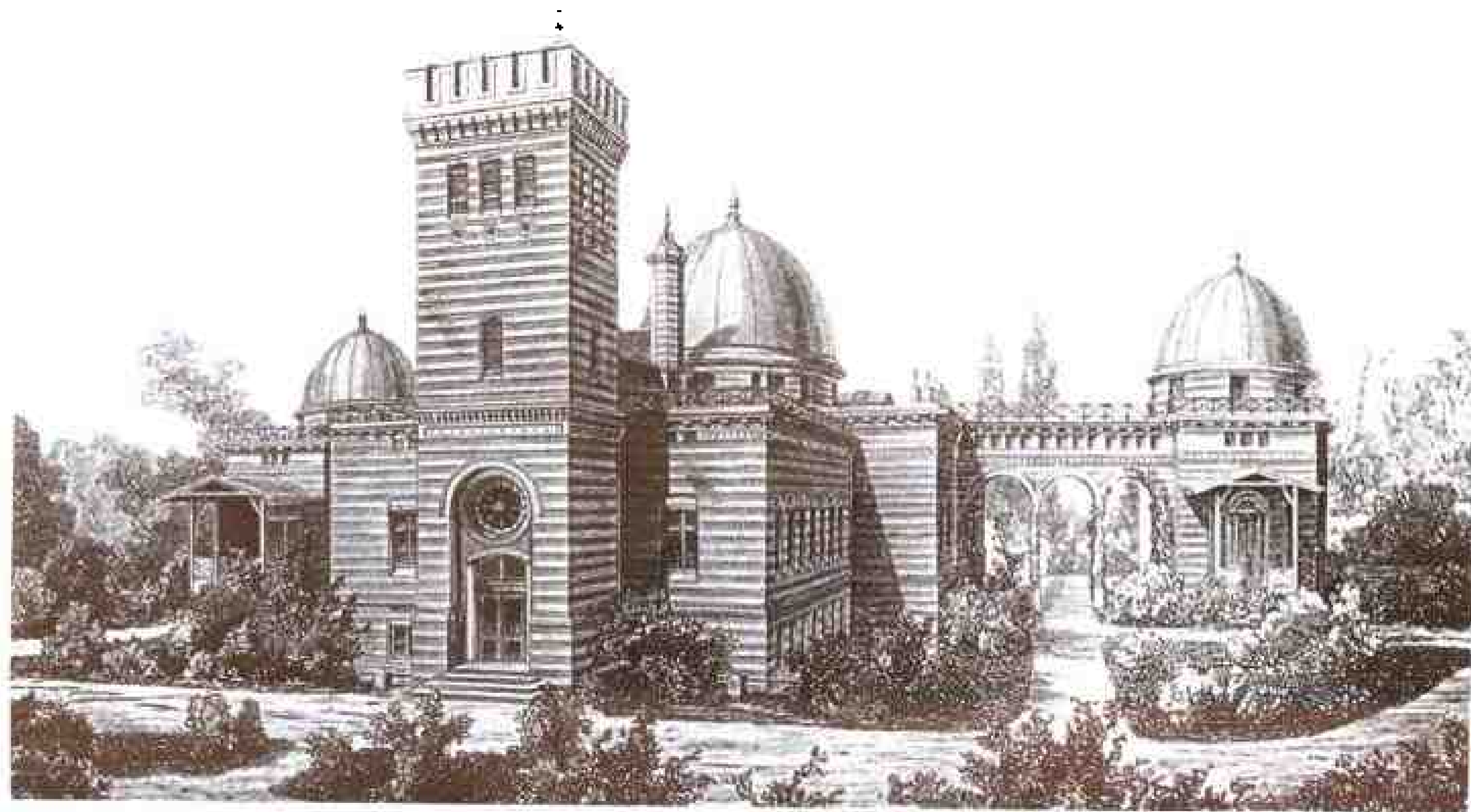
几乎就从这一刻起，照相术开始改变天文学的特点，也将改变天文观测的性质。一方面，大的望远镜，既有折射的也有反射的，被安装上胶片夹和光谱仪来拍摄小片天空的细节，检验单个天体的光谱。另外一方面，从照相室相机改进而来的新型仪器被引入到实测中。按照大望远镜的标准，虽然它们有相对较小的透镜——5到10英寸的口径——但它们有宽广的视场。最后在照相镜头前放置一块小角度的棱镜，每颗恒星能够被发散成一小段光谱，这样一张照相底片上能给出数百颗亮恒星的有用光谱（见本书第282页）。不管是什么仪器，反正天文学家从人眼的局限中解放出来了，从要在寒冷、黑暗的望远镜圆顶屋里进行的困难、精密的观测中解放出来了。当照相术发展完善后，照相图像能够在白天舒适地进行更精确的测量。

在19世纪最后四分之一个世纪里发生的这一切快速变化是偶然的。一批天文台为了天体物理学而不是老的方位天文学而专门建立起来，其他一些老的天文台也开辟了天体物理分部。到1900年，天文学家们拥有了一整套新技术，在接下来的四十多年里，天文学家们用这些技术来解答已经向他们挑战了数个世纪的问题。

安哥罗·塞奇（Angelo Secchi）和恒星光谱分类

第一张天空照相图仅仅比早年那些用艰苦的目视方法编制的星表更完整一点更精确一点而已。它们始终只是恒星在天空视表面上的图像，有限的几颗恒星含有距离——第三维——通过艰难的不精确的目视方法确定。

但是目视星图和照相星图之间的一个差别不久就开始变得很明显了。尽管恒星的位置能被很精确地定下来，但恒星的视亮度则不一样：在望远镜里对肉眼来说似乎相同的两颗恒星的亮度，在相片上可能很不一样。人们知道照相



波茨坦天体物理台。这个机构于1874年创立，是致力于"新天文学"或天体物理学研究的首批天文台之一。



叶凯士天文台的24英寸发射望远镜，八根由铝环连接起来的金属管组成骨骼状的镜筒。这个支架系统对于进行长时间曝光的高质量照相来说被证明是足够牢固的，其他仪器也仿造了这种结构。

底片对黄色和橙色光的敏感度低于人眼，而恒星显然有不同的颜色。

这不是一个新发现。早在1798年威廉·赫歇尔出于好奇，就用一块三棱镜检查了最亮的6颗恒星的光。他记录道："天狼星（Sirius）的光由红色、橙色、黄色、绿色、蓝色、紫红色（purple）和紫罗兰色（violet）等颜色组成……大角星（Arcturus）比天狼星含有更多的红色和橙色、更少的黄色……"但是对这些事实他没有给出解释。

然而，19世纪的物理学家们很明白，当一片金属在实验室中被加热时，它先变得红热，然后变得白热。这暗示着，通过检验恒星的光谱，人们可以知道一些关于恒星温度以及化学组成方面的信息。许多天文学家致力于这方面的研究，最著名的是威廉·哈京斯、科雷乔罗马诺（Collegio Romano）的安哥罗·塞奇

(Angelo Secchi, 1818–1878年) 神父、波茨坦天体物理天文台的沃格尔 (H.C. Vogel, 1841–1907年) 和哈佛大学天文台的皮克林 (E.C.Pickering, 1846–1919年)。

1863年到1867年间，在照相术引入天文观测之前，塞奇已经耐心地检查了大约四百颗恒星的光谱，在1868年英国科学促进会(British Association for the Advancement of Science)的一次会议上，他提出大部分恒星能够被分成四种光谱型。沃格尔在波茨坦独立地得到了类似的分类。我们不再用塞奇的罗马数字分类，但他的分类本质上是正确的，能在后来的分类法中找到它们。塞奇的分类为：

Ⅰ.类天狼星型，带白色的或带蓝色的，含有氢引起的一些暗带，和一些微弱的金属线。

Ⅱ.太阳型——像五车二 (Capella) 和大角星 (Arcturus) 这样的恒星。这类恒星的光谱大都集中在中部黄光带，有无数精细的暗线。

Ⅲ.红色星 (常常是变化的)，像参宿四 (Betelgeuse，属于猎户座)、刍藁增二 (Mira，属于鲸鱼座) 这类恒星，有很长的不规则的光变周期，光谱很宽，每条都在红端增亮而在蓝端变暗，贯穿着等间距的底纹，产生一种凹槽外观。

Ⅳ.类似Ⅲ型的恒星，但颜色更红，谱带也不同。这些恒星很少，在天空中都不亮，通过望远镜目视观测，它们看起来像恒星中的红宝石。

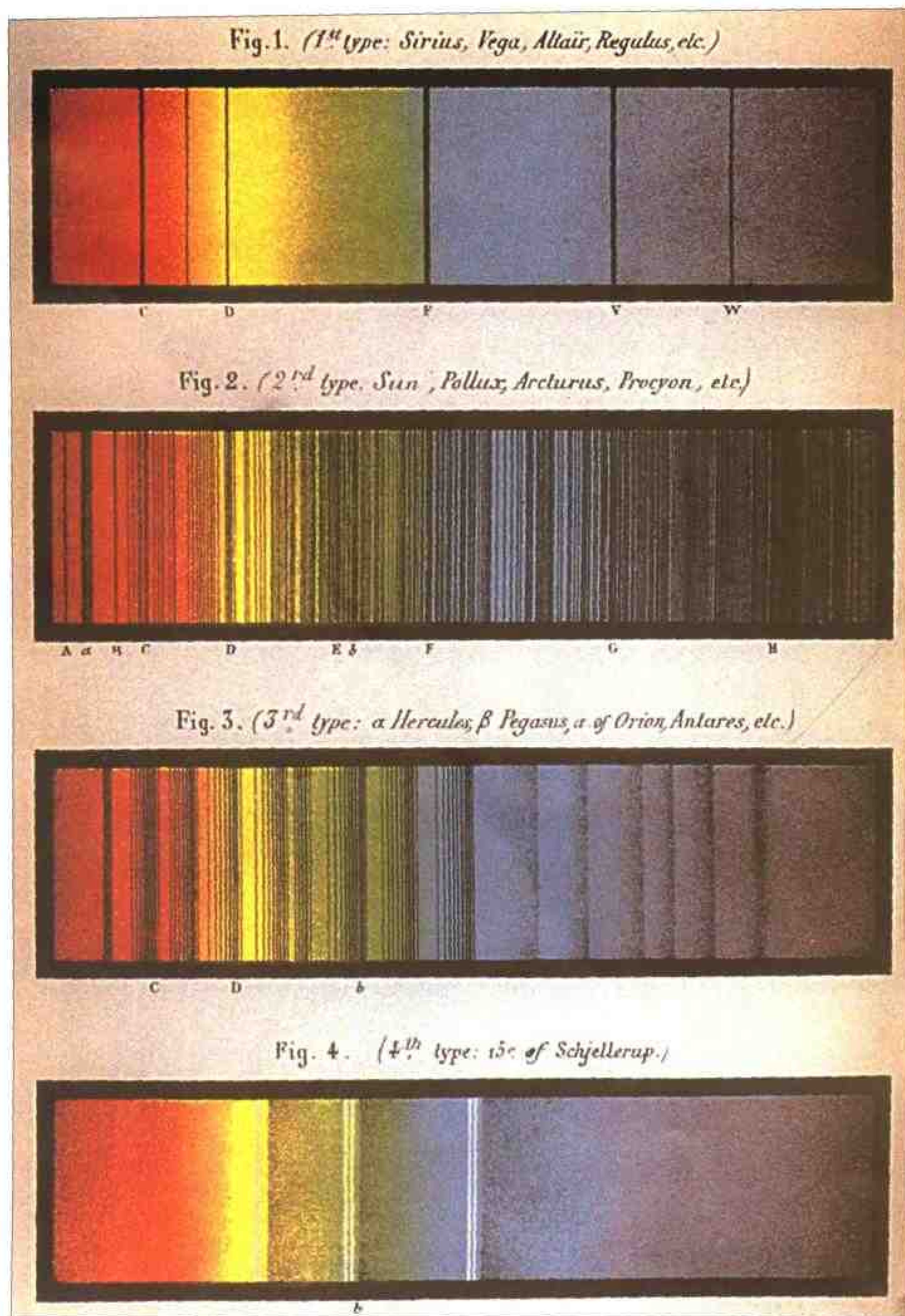
对恒星温度和光谱的早期研究带来了恒星演化学说的初步尝试。莱比锡天文学家佐尔纳 (Friedrich Zöllner, 1834–1882年) 在他1865年出版的关于恒星亮度测量的书中提出，恒星开始形成时是热的，然后自然变冷，经历类太阳型阶段，到红色恒星。

威廉·哈京斯和真星云状物质 (True Nebulosity) 的发现 (1864年)

威廉·哈京斯与他的朋友实验室化学家威廉·米勒一起工作，沿着相当不同的路子前行。他们出于特殊兴趣，观察和解释他们选定的一些特殊天体的光谱，而不像塞奇和沃格尔那样巡察很多的对象。通过一次关键的观测，他已经解决了实测天文学中的一大难题。我们已经看到，威廉·赫歇尔、罗斯爵士和威廉·拉塞尔等的大望远镜被制造出来用于确定星云的本质：它们到底是遥远的不可分解的恒星的聚合呢，还是一团真的星云状物质构成的云雾？1864年8月29日，哈京斯把望远镜指向天龙座的行星状星云，他认为该星云已足够亮而且能产生光谱了。它确实产生了光谱，但是只是显示了几条在绿光部分的明线，有一条显然跟氢有关，但其他几条不能确认。通过对实验室里气体光谱的类推，马上可以得出结论：存在着两种星云，气状的 (行星状星云就是其中的一个例子) 和星状的，分光镜可以区分它们。

到1868年，哈京斯已经观测了大约七十个左右不同形状和大小的星云的光谱。其中大约三分之一是气状的；三分之二有暗弱的连续光谱，可能是不可分离的恒星的光。作为早期天体物理学中的重大发现之一，哈京斯的发现是一项具有重要价值和地位的判决性检验。

当然，事情还有它复杂性的一面。从一开始，就有一些天体，其中的一些很明亮，但不符合人们对恒星的认识。在望远镜看来，它们显然是恒星，有连续的



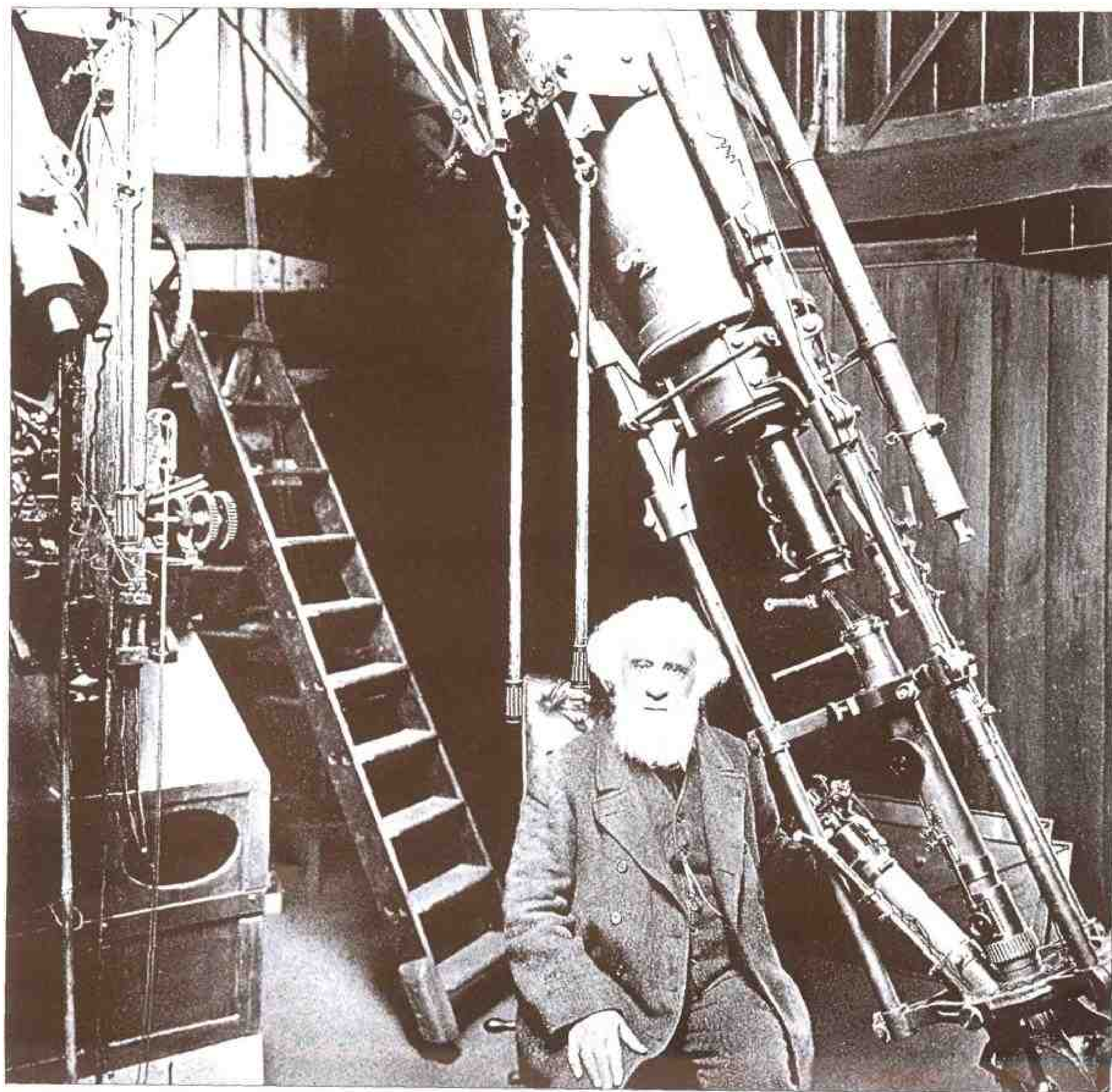
1870年左右出版的一本书中的平版画，展示了塞奇的四种恒星光谱分类，在一架大望远镜上用目视分光镜可以看到最明亮恒星的光谱。对绝大多数恒星来说，光谱的外观将更加暗弱，观测也更困难。在每幅光谱图下面，主要的暗线都被标上了夫琅和费命名的字母。

光谱，有时还带暗线，但光谱中含有明亮的发射线，有些还特别明亮。这些天体中的大多数被认定是变星，其中一些变星经历了一次大爆发，像约翰·赫歇尔19世纪30年代在好望角观测到的阿耳古斯η星（Eta Argus，现在叫做船底座η星，Carinae η）。它们向未来提出了问题。也许大多数这些恒星的表面像我们在太阳上看到的一样，覆盖着明亮的光斑？或者它们是正处于星云向恒星过渡的天体，

威廉·哈京斯

威廉·哈京斯（William Huggins）1824年2月7日出生于伦敦。作为一名年青人，他受环境所迫，而置身于家族的生意。但是，在1854年他成功地摆脱了生意，能够将他的热情全部投放到天文学中。

获悉了古斯塔夫·基尔霍夫1859年的发现，即太阳的化学成分由它的光谱揭示之后，哈京斯立刻意识到这个方法可以用到恒星和星云上去，为了这个目的他与一位化学教授W.A.米勒建立了合作。1875年他结婚之后，他年轻的妻子玛格丽特成了他研究中很投入的伙伴。哈京斯（这里看到他跟皇家学会借给他的带分光镜的15英寸折射望远镜在一起）迅速成为"新天文学"的世界领袖，并一直是该领域内的先锋，直到1908年他不佳的身体状况迫使他放弃了研究。他于1910年5月12日逝世于南伦敦图尔斯山（Tulse Hill）的家中。



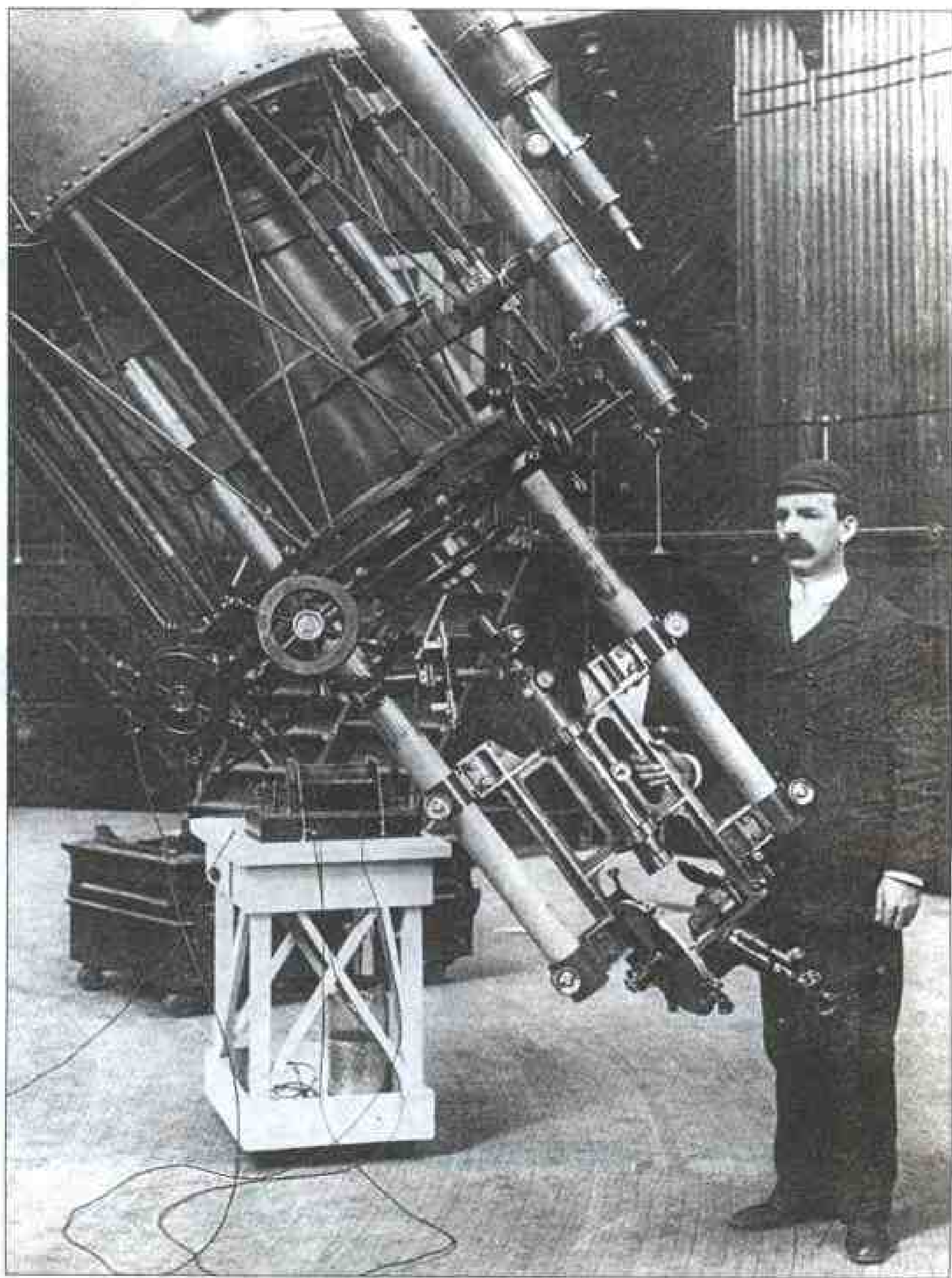
或者反过来，是恒星向星云过渡的天体？

最早的恒星视向速度

分光术还提供了预想不到的天体本质信息：即恒星的空间运动。1842年布拉格大学的多普勒（Christian Doppler，1803–1853年）提出恒星的颜色会受到恒星速度的影响；一颗退行恒星的光的波长会变长，所以光会变红。多普勒效应确实存在，但在具体细节上，多普勒是错的。一颗典型恒星相对于我们的运动速度（就说是每秒20公里吧）比光速（每秒300000公里）小得太多，所以对恒星颜色的影响是觉察不到的，但是像暗吸收线这样的精细特征的明显频移是能够被测量到的，通过这个就获得了一颗恒星朝着或背离地球的速度。

1890年的W.W.坎贝尔(Campbell)，这位未来的利克天文台台长，当时他自愿在这个天文台做J.E.凯勒的助手。他正站在两年前安装的36英寸折射望远镜边上。安装在目镜端的是匹茨堡的约翰·布莱歇尔制造的分光镜。它有很大的有效孔径，使得它成为“挂在望远镜目镜端的庞然大物”。它给出图像很明亮的光谱，使得凯勒能够研究恒星和星云的视向速度。

哈京斯首先尝试了这种测量，但对他的仪器而言，这种测量太困难了。在1890年前后，沃格尔和波茨坦的尤利乌斯·沙伊纳、加利福尼亚利克天文台的詹姆斯·凯勒，对几颗亮恒星首次做了与现代结果相符合的测量。它们的精度在每秒几公里之内。类似的测量在许多年之后还很困难，但是它们的价值被一些天文学家认识到，像叶凯士天文台的E.B.弗洛斯特（他到了波茨坦学习沃格尔的方法）和利克天文台的W.W.坎贝尔，他坚持这项工作。困难在于谱线的微小位移，几千分之一毫米的误差会造成每秒几公里的误差。在长达一两个小时的曝光过程中，移动的光谱片自身的重量使得它下垂，并由于室内温度的降低而收缩。有必要仔细设计光谱片的框架并把它封装在护套里，使温度变化保持在几分之一度的范围内。相对少数的一些天文学家的耐心工作慢慢积累起了一份恒星视向速度的列表，到1950年这份列表包含了大约一万五千颗恒星的数据。



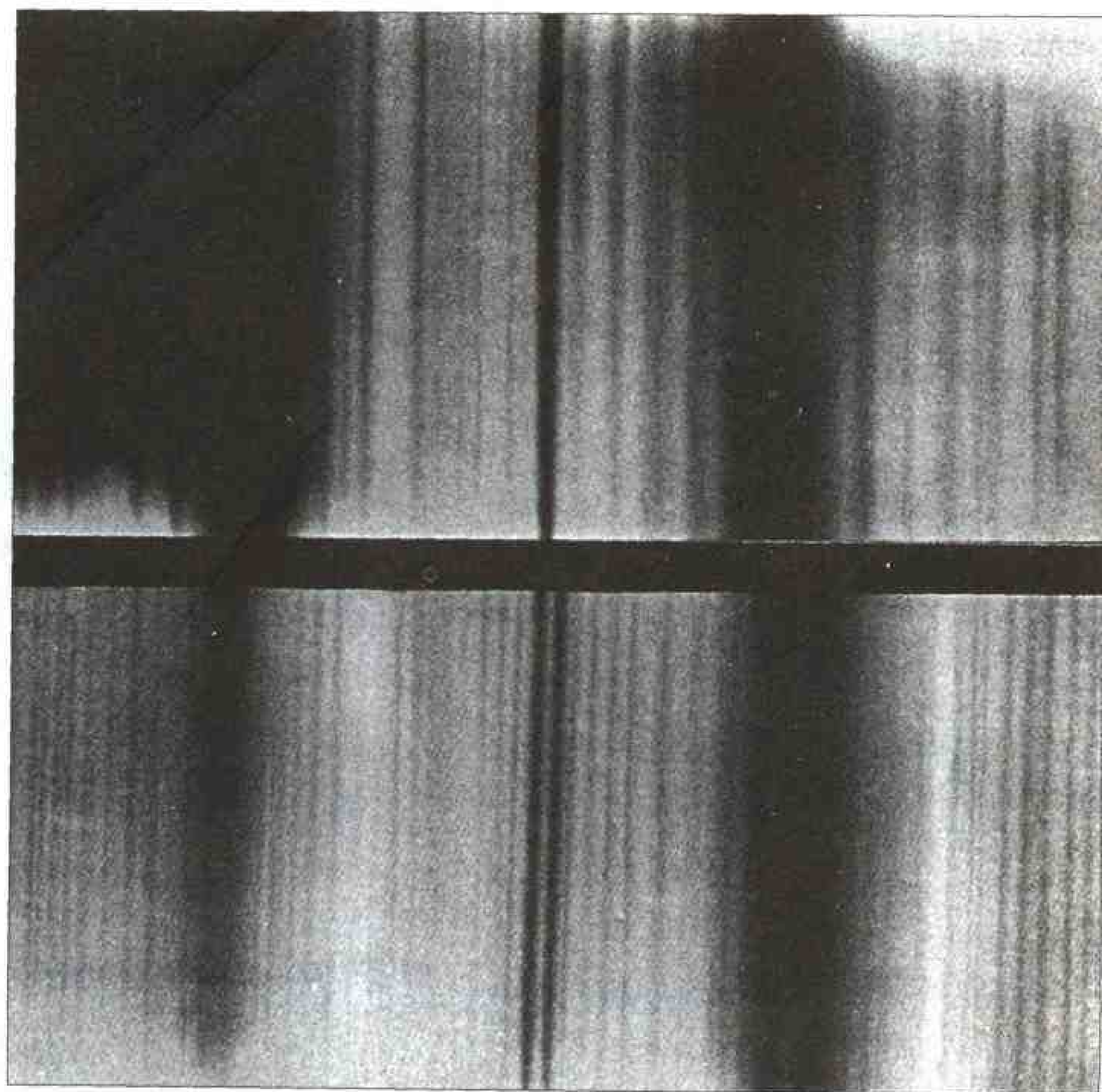
分光双星

多普勒效应解释了哈佛大学天文台台长E.C.皮克林（Pickering）在1887年和安东妮亚·莫里（Antonia Maury，1866–1952年）接着做出的发现。大熊座尾巴处的亮星开阳（Mizar，大熊ζ）的光谱包含一些变化：有时，熟悉的明晰的暗吸收线分劈成靠得很近的两条。开阳被证明不是一颗单独的恒星，而是由两颗星组成。在整个19世纪一直延续着对双星（运行在绕它们共同引力中心的轨道上的一对恒星）的研究，但这里有一种新的类型：两颗恒星靠得非常近，目视观测看起来，它们毫无变化地是一颗恒星，但是在它们的轨道运动中，当其中一颗恒星靠近地球而另一颗远离地球时，就

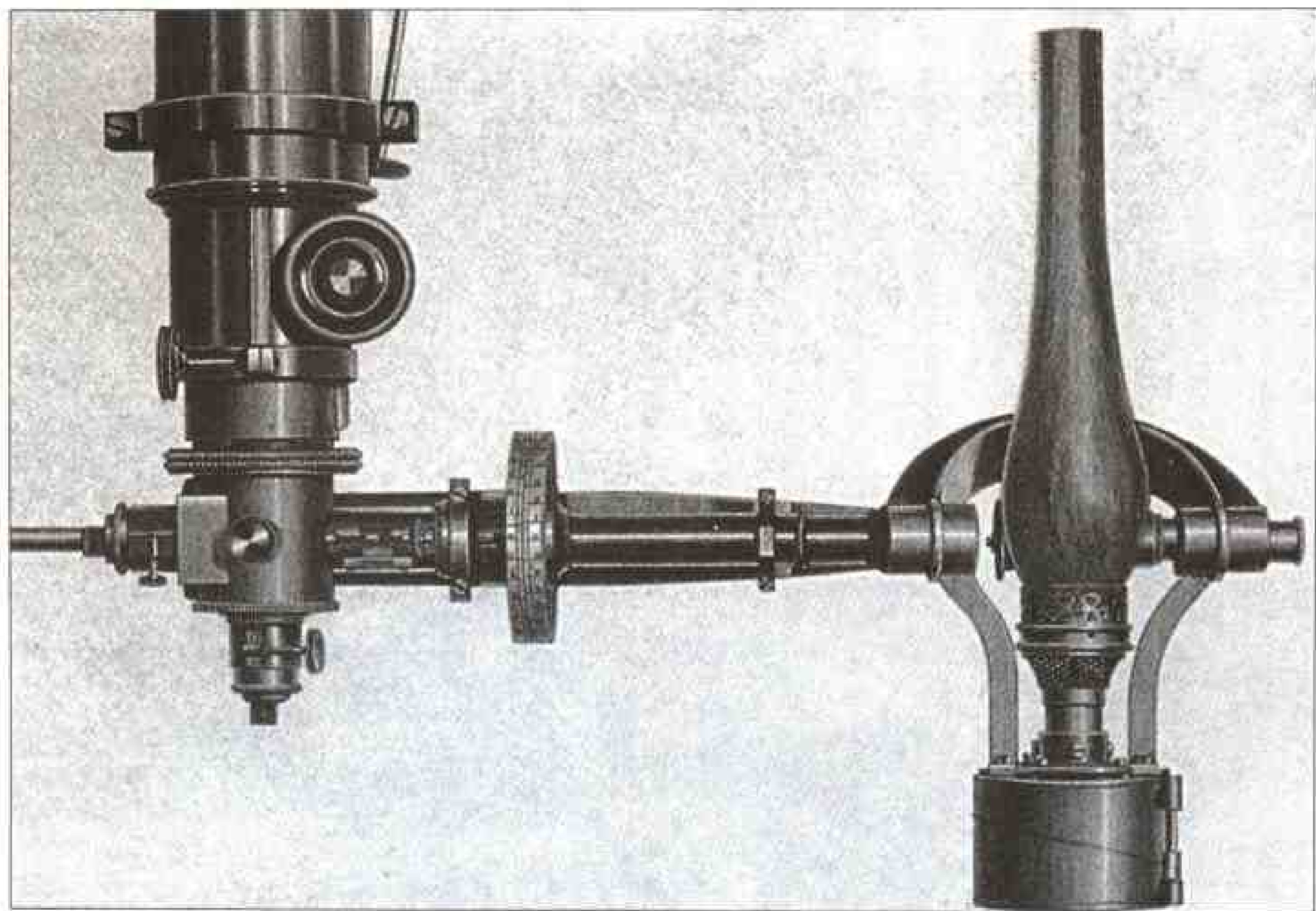
显示出两份光谱线来。其他类似的密近“分光双星”如五车二，不久就被发现，并在后来被证明是非常重要的。在特殊情形下，当地球处在密近双星的轨道面上，其中一颗恒星能够经过地球和另- -颗恒星之间。这些双星叫做“食双星”，如大陵五(Algol，见192页)，对这些看起来像是一颗单独恒星的亮度和光谱变化的仔细分析，能够得出这些恒星的大小、温度、间距和质量等信息，而通过其他方法则无法获得这些。

测定那些人们有特殊兴趣的恒星的距离的需求在不断增加。经过19世纪30年代(见本书第204—205页)和40年代对少数几颗最近恒星的距离的成功测量之后，目视方法开始被证明几乎是行不通了，并且对同一颗恒星、不同的观测者会令人泄气地得出不同的结果。照相术与长焦距折射望远镜的结合再次被用到，测量的过程从望远镜上转移到了实验室。但是直到进入20世纪很久，恒星距离的测定还只是停留在可能性的边缘，即使是75光年远的恒星也有20%甚至更多的误差。在尚未测定其深度的星系海洋中，恒星距离的知识仅仅局限在本地一群恒星的小池塘里。

恒星星光尚有一个本质属性有待精确的测量，这就是它们在天空中看起来的



御夫座β的光谱，哈佛大学天文台在1889年几个连续的夜间拍得。在上面照片的中央，看起来是单一的粗的暗线(K线)，在下面的照片中分成了两半。产生其中一条暗线的恒星正向观测者运动，另一颗则正离开。这里事实上有两套光谱，当两颗恒星绕它们的共同质心作轨道运动时，它们的光线产生的多普勒位移交替地向蓝端和红端移动。



产生人造恒星以进行星光精确测量的仪器，莫斯科天文台维托德·泽拉斯基1887年一篇博士论文的题目。要被测量的恒星通过望远镜的目镜观测（左），并与灯（右）中产生的人造恒星光进行比较，人造恒星光通过一个可变的孔（中）进入目镜。

亮度。自从古典时期开始，恒星被分成不同的星等，天空中最亮的恒星是一等星，晴朗夜空中目视可见的最暗的星是六等星，一等与六等之间的5个间隔由估测而定。当最早的一批望远镜揭示了更多更暗的恒星之后，度量被延伸下去，但多少带点臆测的成分，一颗被一个天文学家归为8等星的恒星，也许被另一个天文学家归为11等星。

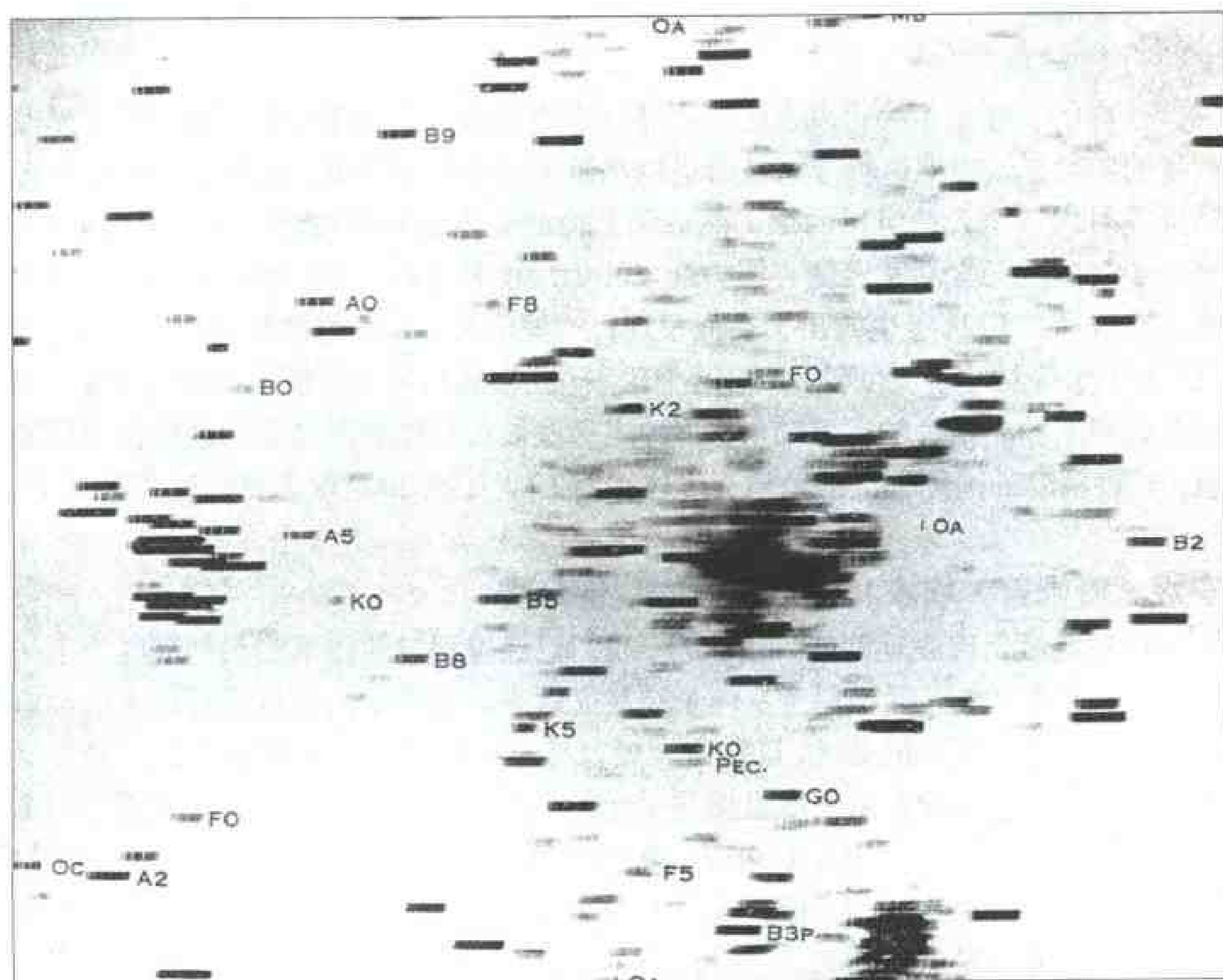
这样的事显然不会再度发生。进展分成两步取得。物理实验室里进行了光度测量的实验，慢慢地这种方法被改进以满足天文学家的需要。例如，在望远镜视场里投射入一个人造恒星的像，然后调节像的亮度直到与被测恒星的亮度一样。第二步由英国天文学家诺曼·波格森（Norman Pogson）在1856年跨出。他发现（哈雷早在1721年也做出了类似发现）一等星大致比6等星亮100倍。通过假定5.0个星等对应于亮度差100倍这个比率，他精确地定义了恒星亮度的度量。利用望远镜上的光度计的测量结果，再约定一些被很好地观测过了的恒星作为标准星，一种精确的国际公认的恒星亮度体系在19世纪和20世纪之交被建立起来了。

安妮·詹姆普·坎农和恒星光谱的哈佛分类

这些亮度是肉眼观测的"视亮度"。我们已经提到过照相术测到的亮度是不一样的，一种类似的"照相星等"体系被建立起来。物理学的进步足够让人们理解更热的恒星发射更多的蓝光，这些蓝光更容易被照相底片记录下来。"色指数"是两种星等之间的差异，用来度量恒星星光的颜色，它与温度有直接的关系。一个大的色指数，譬如说1.5等，暗示着一颗有较低表面温度的红色星。在后来的年份里引入了更多的精细改进，特别地，从1920年起，灵敏的光电管代替了肉眼进行的估计。但原理是一样的。



在哈佛大学天文台从事恒星分类工作的一群女性。19世纪80年代晚期、哈佛天文台台长E.C.皮克林（左侧）一次雇用了15位以上的女性，归威廉米娜·弗莱明（站立注视者）统领、她给人留下一个严格的纪律维持者的形象。1890年发表了获得的第一份德雷珀星表，列出了超过10000颗恒星的光谱型和星等。



用于编制纪念性的亨利·德雷珀星表的一幅典型照片。这些照片主要用8英寸孔径的照相机、通过角度为5°或13°的棱镜拍摄。这一幅照片拍摄于秘鲁阿雷奎帕的南方分台，是围绕船底座η变星附近的天区。一些恒星的光谱型已被标出，因为这幅照片作为1924年出版的最后一卷主星表的封面插画出现。

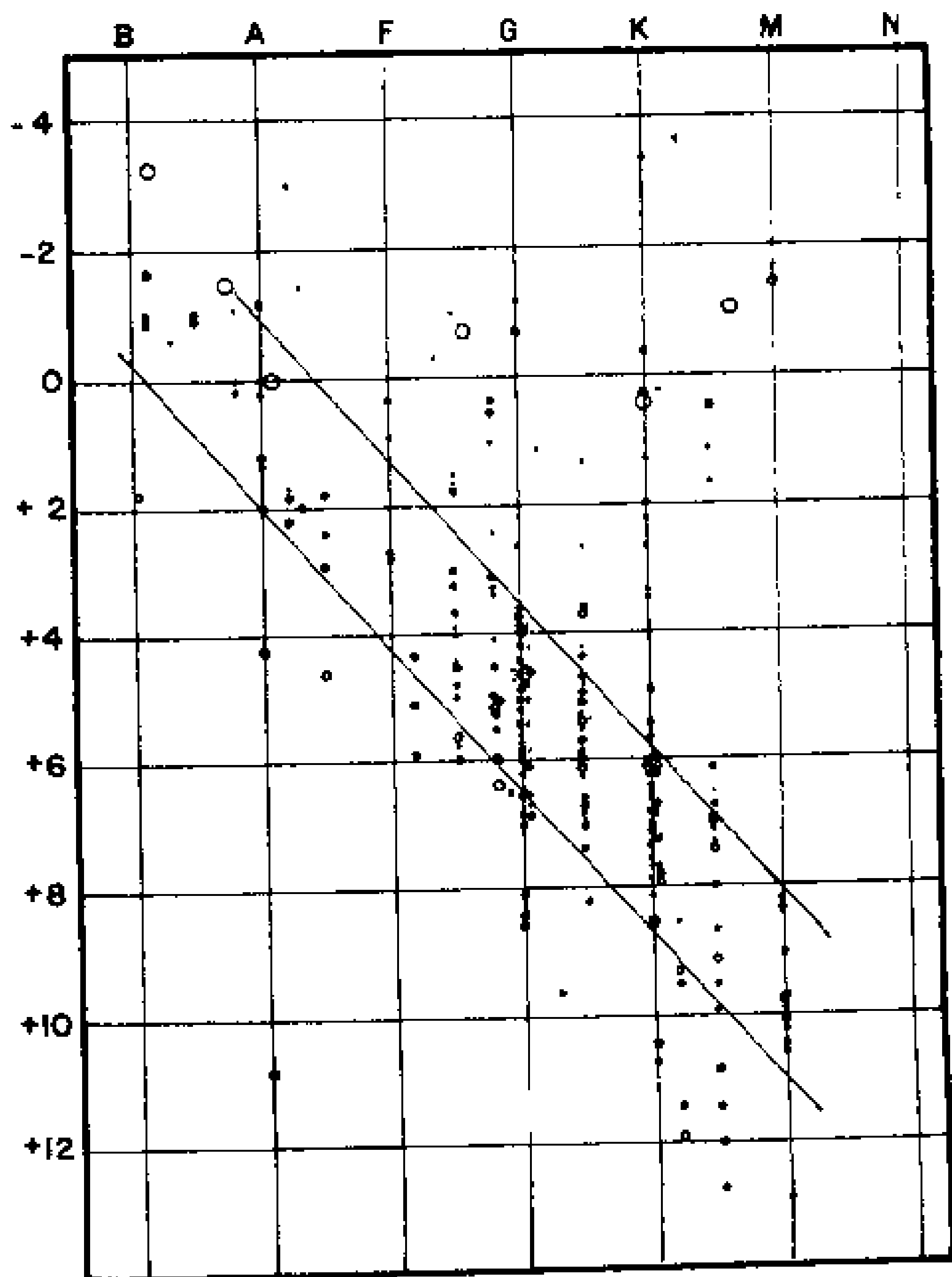
这些进展使得有可能把塞奇和沃格尔提出的恒星光谱型分类精致化。这项工作始于亨利·德雷珀，他于1882年英年早逝。作为对他的纪念，他的家族向哈佛大学天文台提供资金以置备仪器和招募额外的研究人员，来继续德雷珀的工作。对于塞奇的四种类型，德雷珀代之以16种，用A、B、C等字母来标记。随着对恒星的更好了解，这些原先表示各种各样的光谱线外观的字母，被重新安排成大致按照恒星表面温度的降序排列，并稍做了简化。光谱型分类的最后次序是O、B、A、F、G、K、M、R、N、S，如果对光谱的描述足够细微，可以对某些分类按照数字进一步细分。这样，例如太阳，就成了一颗G2光谱型的恒星。

因此哈佛天文台台长皮克林开始对整个天空的分光巡天（哈佛大学在南半球建立了海外天文台）。这项工作用到一架广角照相仪，配备一个前面描述过的物端棱镜。皮克林是幸运的，他技艺娴熟的助手们中有安妮·詹姆普·坎农（Annie Jump Cannon，1863—1941年），因为她的巨大勤奋对1918年到1924年（后来有所扩充）间亨利·德雷珀星表（HD星表）的出版是至关重要的。这份包含了大约225000颗恒星的光谱型和亮度资料的星表，是“恒星光谱领域里的一项伟大工作”，至今仍有其价值。值得提出的是，佐尔纳早年的设想，即分类的次序对应恒星生命的历史，如果不能全部接受的话，也还是有一定用处的。O、B、A等型的恒星对应于“早年型恒星”，G、K、M型则是“晚年型恒星”。在天文学家中间这种用法很奇怪地一直延续着，直到人们知道事情比这远远复杂之后。

1913年H.N.罗素（Russell）关联恒星绝对星等跟它们的光谱型的图。哈佛的光谱分类者们已经留意到了一些相同光谱型的光谱之间有一些细微的差异，尤其一些光谱型靠后的恒星光谱中有一些非常窄的暗线。1905年埃吉纳·赫兹普隆注意到这些恒星的自行很小，因此可能是非常遥远和高亮度的。这是首次指出了后来被称作“巨星”和“矮星”的存在，这一点也由罗素图中的恒星分布得到了强调。

星等对光谱型作图：赫罗图

大约到1910年，对于相当大量的恒星，可以得到两项独立的信息。第一项是光谱型，或者色指数，或者恒星的表面温度，它们彼此紧密地联系在一起。第二项、确定起来非常困难，是恒星的距离，这使得人们能够把“视星等”换算成“绝对星等”或“光度”。



要提出的问题是：一颗具有特殊绝对星等的恒星能够属于任何一种光谱型或者具有任意的表面温度吗？或者宇宙中只允许有这些量的某些组合？换一句话说，如果把每一颗恒星的绝对星等值相对于光谱型作图，这些点会散布在整个图上，还是只处在某些区域？1913年普林斯顿大学的亨利·诺里斯·罗素（Henry Norris Russell，1877—1957年）利用他认为合理可靠的所有恒星的距离画出了这样一幅图。他的部分工作被罗森伯格（H.O.Rosenberg，1879—1940年）和赫兹普隆（Ejnar Hertzsprung，1873—1967年）领先了一二年，他们分别对昴星团和毕星团的每一颗恒星画了类似的图。任何一个星团内的恒星几乎都处在同一个距离上，它们的视星等与绝对星等紧密相关。

这样的图在理解恒星的演化方式时变得至关重要：它们被叫做赫兹普隆－罗素图，或者按照天文学家们的

行话，叫做赫罗图。即使根据他的第一张图，罗素觉得他能够断言，自然确实限制了恒星能够存在的种类。恒星分布在两个主要的带上。一个被叫做主星序，它们从上面左边亮的热恒星向下延伸到右下角本质上是暗的冷恒星。顶部横贯着巨星支，最亮的恒星可以属于任何一种光谱型。

随着观测精度的提高，赫罗图的这些特征得到了证实，并认识了更多的其他特征。1914年亚当斯（W.S.Adams）和赫尔斯朱特（Arnold Kohlschutter）在威尔逊山天文台做出的一项重要发现是，同一种光谱型的主序星和巨支星的光谱之间有细微的差异，这种差异表现在特殊的谱线对的相对强度上。哈佛的分类者们事实上已经记录了这样的差异，但并不理解它们。如今，通过仔细研究一颗恒星的光谱，能够确认这颗恒星属于标准赫罗图的哪一部分，读出它的绝对星等，然后从观测知道它的视星等，从而确定它的距离。随着20世纪30年代摩根（W.W.Morgan）和他的合作者们在叶凯士天文台仔细地把哈佛光谱分类方案精致化，这种利用赫罗图从恒星的光谱型和视星等来确定恒星距离（分光视差）的逆方法，成了确定那些遥远的用三角学方法无法获得的恒星距离的有力工具。

原子光谱和恒星的化学成分

到1920年左右，天文学界已积累了有关光谱的大量知识。同时，在太阳物理方面，又有新的发现。例如，荷兰物理学家皮埃特·塞曼（Pieter Zeeman，1865－1943年）在1896年发现，在实验室里存在强磁场的条件下，会产生跟铁相关的一些谱线的分裂。这个结果被迅速地用于确认和测量太阳黑子中的磁场强度。

现在热蓝星的光谱显示只有少数非常暗的氢谱线和氦谱线，在冷一点的恒星光谱中它们非常暗弱，但是有数不清的跟金属有关的，如铁和铬的谱线。这是否意味者在热星里没有铬？并且为什么在太阳的外层似乎只是由同一种混合气体构成，较凉的太阳黑子光谱与光球光谱却有很大不同呢？

对大量的这些经验知识的解释即将到来，但是它来自物理学领域关于辐射和原子结构的相关发现。1901年普朗克（Max Planck，1858 － 1947年）宣布他的量子理论，根据该理论，光和其他辐射如X射线等，以不连续的能量包的形式被发射和吸收。1911年新西兰人卢瑟福（Ernest Rutherford，1871－1937年）在曼彻斯特提出一个原子模型，一个带正电的核被一团带负电的电子云围绕。两年后，丹麦理论物理学家玻尔（Niels Bohr，1885－1962年）结合了上述两种理论的基本特征，提出一种新的原子模型，此模型不仅能够解释光谱中的锐利谱线，并能计算它们的波长和预言所要寻找的新谱线的波长。尽管这仅仅是一个用来计算和预言的模型，但“玻尔的原子”有非常大的用处，即使随着量子力学和电子波动理论的引人，人们已经认识到真实的原子必定更加复杂，它还继续被用来解释天文学上的光谱。

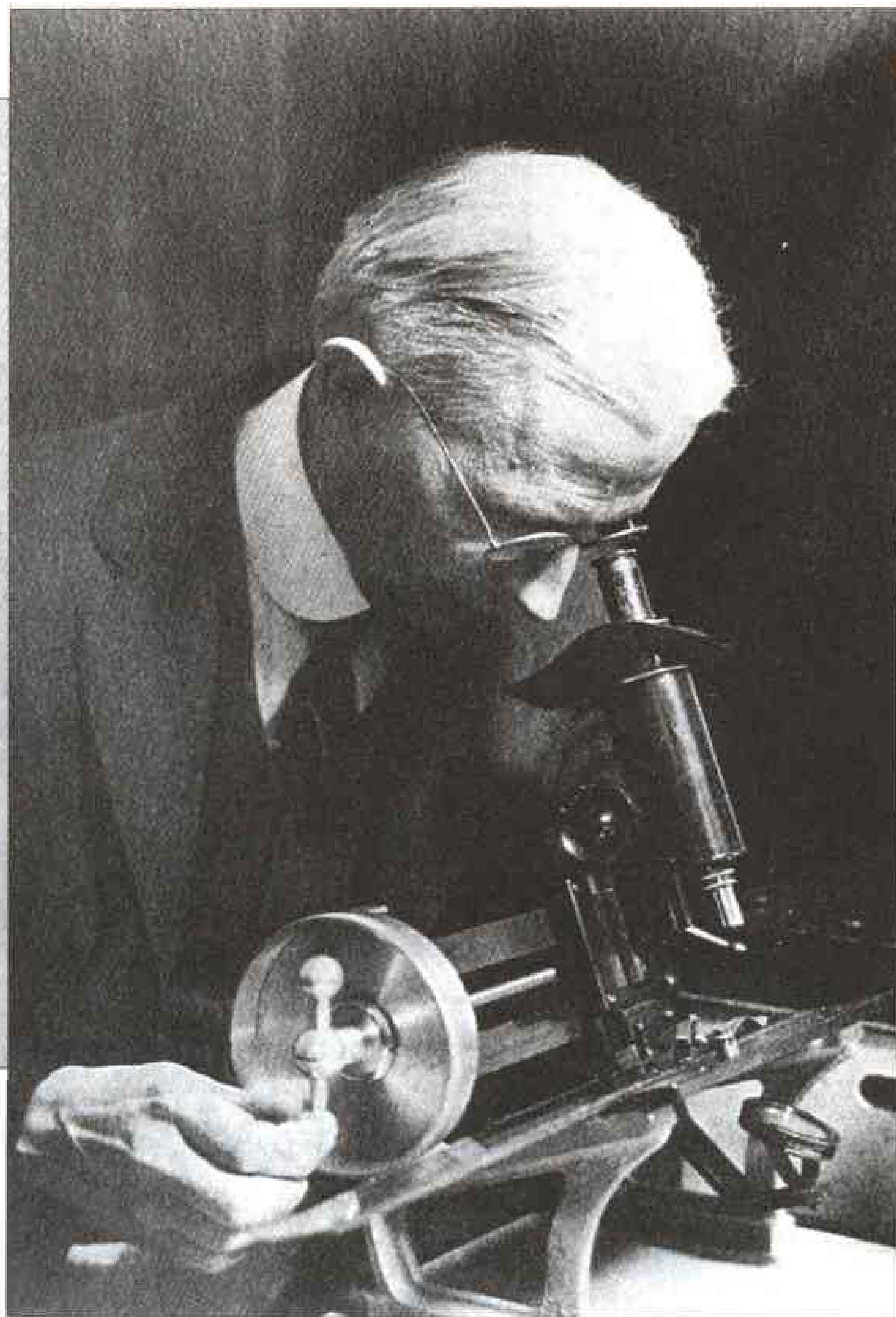
在玻尔的原子模型中，带电的原子核被带负电的电子围绕，负电荷与原子核的正电荷正好相等，因此整个原子是中性的。电子按层排列，绕核转动，电子轨道的数目和排列决定了那种元素光谱的谱线模式。而当气体被加热，原子能够失去它外层的电子，变成“电离了的”带正电的原子，改变了电子轨道给出的一种完全不同的谱线模式。

亨利·诺里斯·罗素

亨利·诺里斯·罗素1877年10月25日出生于纽约澳斯特湾。他先在普林斯顿学习天文系，然后到了剑桥成为一名研究助手。1905年他成为普林斯顿大学的天文学讲师，1911年被提升为教授，1912年被任命为该校天文台台长，并担任此职直到1947年退休。

尽管健康状况一般，罗素仍是一名不知疲倦的研究者，他的研究兴趣跨越了天体物理学的几个大的领域。他是一位出色的交流者，他对任何新观念的判断与洞察，如果不总是正确的话，也是值得信赖的。就在美国天文学界的影响而言，只有G.E.海耳可与之媲美。

退休之后，罗素仍旧受聘于利克天文台和哈佛天文台进行研究。他于1957年2月18日在普林斯顿去世。

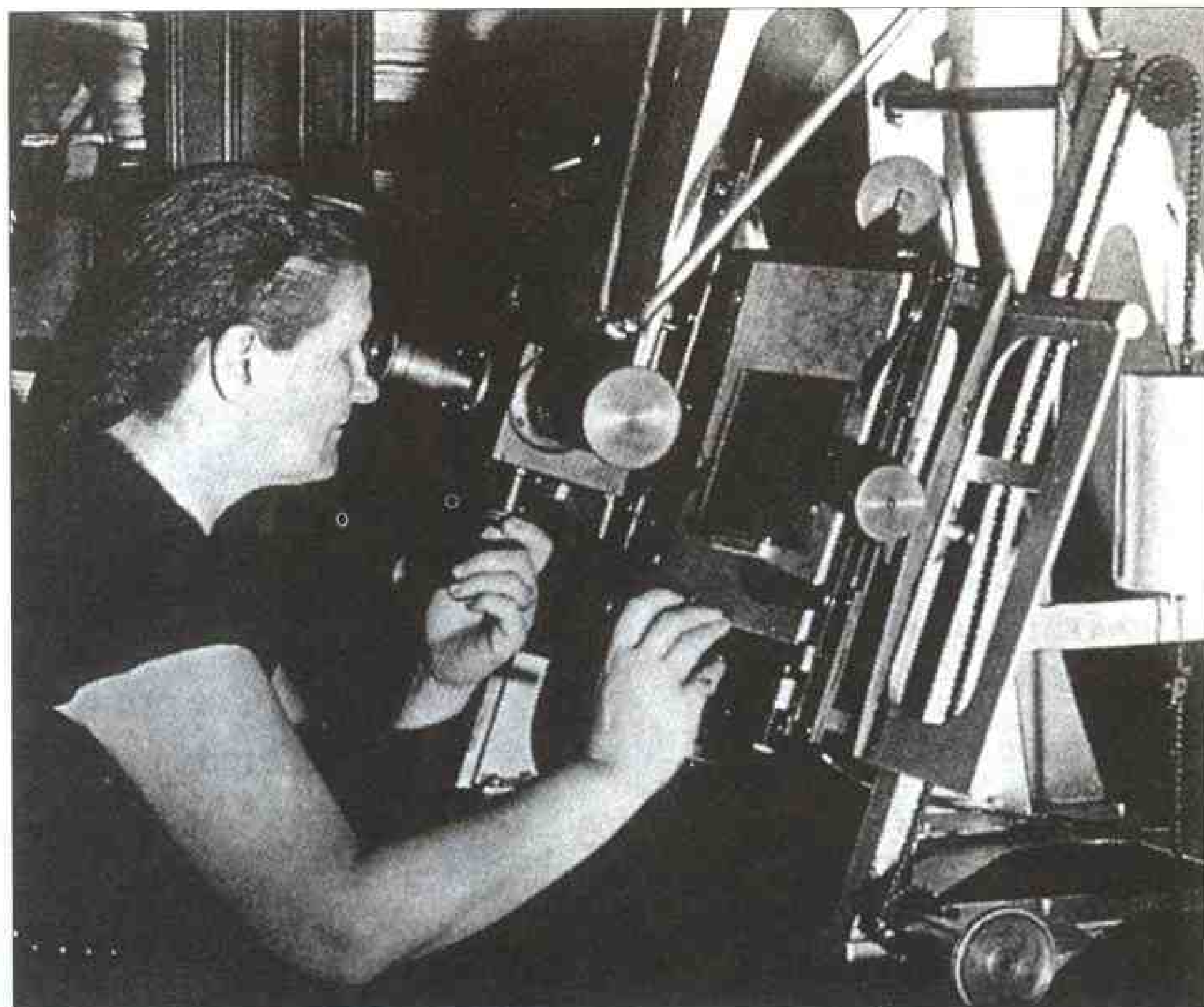


这种理论，结合有关太阳和恒星外层温度和密度的知识，被印度物理学家萨哈（Meghnad Saha，1894－1956年）用来非常令人满意地解释了不同类型恒星光谱的巨大不同，以及同一光谱型的巨星光谱与矮星光谱之间的细微差别。这还在理论上支持了对分光视差等一些方法的使用，在此之前这些方法只是建立在经验事实基础之上的。

塞西利亚·佩恩和恒星中的氢丰度

1925年塞西利亚·佩恩（后来的佩恩－伽玻斯金，1900–1979年）在哈佛大学天文台完成的博士论文清晰地建立了恒星温度和光谱分类之间的关系，并进一步考虑了元素的相对丰度，提出有证据表明在大多数恒星中，氢的丰度比原先设想的要高得多。起先这个想法没有被接受，但是到了1929年，例如罗素就被说服了。他在写到有关太阳大气时总结道：它含有“60份的氢（体积上），2份氦，2份氧，1份金属蒸气，0.8份全部来自金属电离的自由电子”。后来的研究将改变这些数字，但不改变主要结论。恒星中丰度最高的是氢，其次是氦。

1946年左右的塞西利亚·佩恩—伽玻斯金(Cecilia Payne—Gaposchkin)，可看见她正用闪视镜（见本书第308页）比较两张照片。毕业于剑桥大学之后，她到了哈佛大学天文台进行博士阶段研究，她余下的生涯便在哈佛大学天文台度过。他1925年关于恒星元素丰度的论文，被奥托·斯特鲁维称为天文学上最出色的博士论文。



物理理论的运用带来进一步的解释。譬如，加州理工大学的包温（Ira S. Bowen）在1927年指出原先以为跟未发现的“氦”（nebulium）元素有关的谱线，其实是由氧的异常电离态引起的。1941年（正如前面提到过的）本吉特·埃德棱（Bengt Edlen）类似地解释了“氪”（coronium）元素谱线是由铁元素产生的。

爱丁顿和质光关系

大约同时，实测和理论的互动结出了另一个丰硕的果实。恒星的大小不能直接通过望远镜来简单地测量它们的圆面而测定，因为它们太遥远了。可以通过两条途径来推断恒星的大小：通过研究食双星，或者通过计算什么样的恒星表面积（也就是直径）会在所观测到的恒星表面温度（色指数）上辐射出所观测到的总能量（绝对星等）。为了确定恒星的密度和它表面处的引力，需要知道恒星的质量——恒星包含了多少物质。

有一种方法，也只有靠这一种方法，即通过对测定的双星轨道，运用牛顿的万有引力定律，可以来确定恒星的质量。这就是为什么对这些恒星的研究非常重要的原因，来自密近分光双星的信息十分宝贵。但是只有对数量相对较小的恒星才可能获得这样的信息。然而，有一点变得很明显了，恒星的质量差异之大可能令人吃惊。1924年，剑桥的爱丁顿（A.S.Eddington，1882—1944年）收集了可得到的信息，发现恒星质量可以小到五分之一太阳质量，大到25倍太阳质量。更为重要的是，他令人信服地指出，这些恒星的质量与它们的绝对星等之间有非常

紧密的关系，即存在着一种所谓的质光关系，大质量的恒星有大的光度——25倍太阳质量的恒星发射出的能量是太阳的4000倍。

恒星能量的来源

恒星所有的这些能量来自哪里？最后，这个曾经让19世纪物理学家们如此困惑的问题的答案，似乎被看到了。人们越来越相信，答案的线索藏在爱因斯坦的广义相对论里面，该理论认为质量能够转化为能量。在一本半普及描述性读本《恒星和原子》（1927年）中，爱丁顿推测，四个氢原子（每个含1个质量单位）能够聚合成一个氦原子（略小于3.97个质量单位）。“在我看来，氦的存在是我们期待氦形成的最好证据……我知道很多批评者认为恒星的条件不足于产生这些变化——恒星还不够热。批评者们把他们暴露在了一个明显的反驳之下了，我们告诉他们，去找一个更热一点的地方来。”

爱丁顿是对的，他所设想的在恒星热内核所发生的核反应，最终被证明是主序星能量的来源。但在那个时候，他除了推测，不能做别的，并且他认为还有另外的可能性。在同一个段落里他继续写道：“然而证据不是十分一致，我认为我们还没有到得出一个明确结论的地步。”需要从核物理学中获得更多的信息来理解这些核反应是怎样进行的。这显然还需要几个步骤，因为四个氢原子瞬时地碰撞在一起形成一个氦原子的概率似乎非常低。几位物理学家和天文学家在20世纪的30年代里研究了这个问题。

英国的亚特金森（R. d'E Atkinson）和荷兰的霍特曼斯（F. Houtermans）在哥廷根一起工作，他们在1929年提供了一个恒星内部轻元素之间核反应的初步理论。1931年亚特金森在新泽西鲁杰尔斯大学（Rutgers University）获悉新

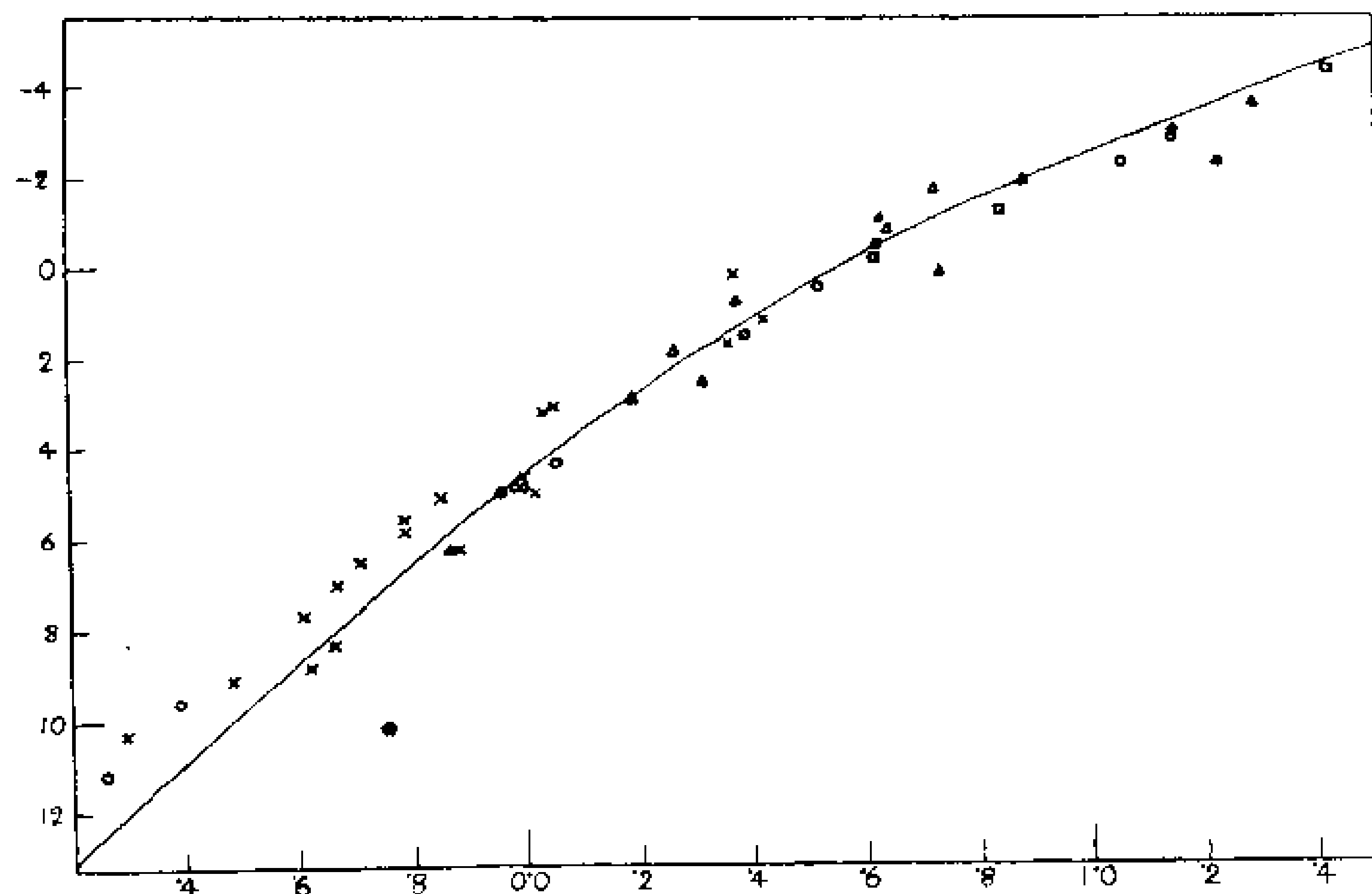


图1.纵坐标－绝对星等 横坐标－质量的对数

○ 第一类恒星 × 第二类恒星 □ 造父变星 △ 食变星

A.S.爱丁顿1924年的恒星质光关系图。图绘出了绝对星等（纵坐标）相对于质量对数（横坐标）的关系。每个符号代表一颗恒星。太阳（未给出）的绝对星等将会是5，质量正好是1（其对数等于0）。画出的曲线是理论上的。

近被公认的恒星内部氢的大丰度，并考虑了氢聚变成氦会如何进行的机制。后来在德国，范·魏兹扎克（C. F. von Weizsacker）解决了进一步的反应如何产生比氦更重的元素的问题。

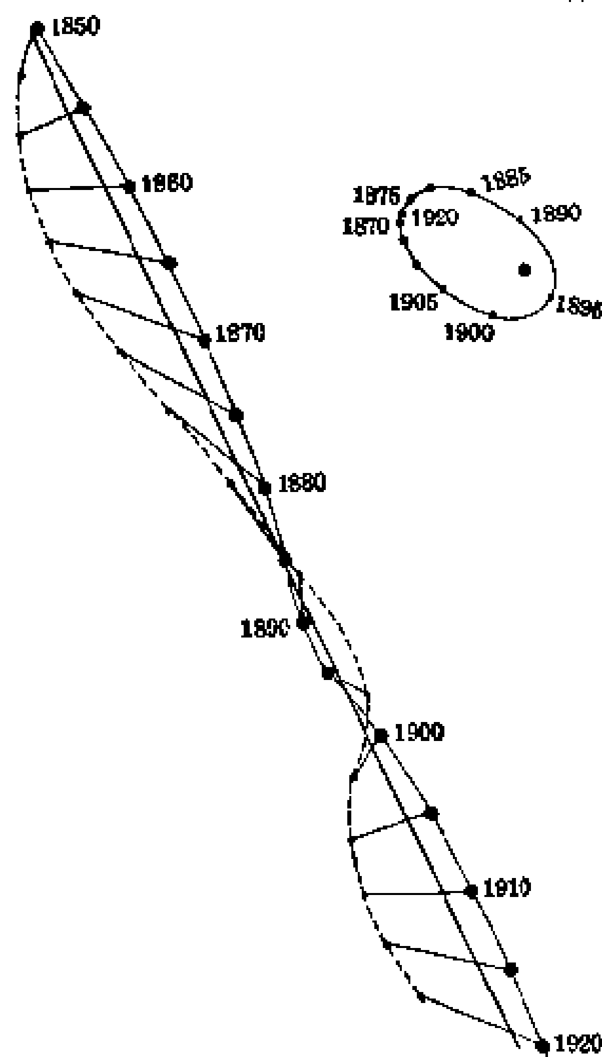
最后，1939年出生于德国的贝蒂(H.A. Bethe，1906 -)在康奈尔大学(Cornell University)提出一个被普遍认为是切实可行的机制，该机制与已知的核物理学知识和被公认的恒星内部密度、温度条件相一致。对恒星内部条件的认识发端于爱丁顿在他1926年的经典著作《恒星的内部结构》中的工作。

但那是1939年，具有讽刺意味的是，许多对这个问题的解决做出过贡献的人，不久就发现他们卷入了将他们的知识服务于更实用、更冷酷的军事目的。

1844年F.W.贝塞尔指出，天狼星不是如期望的那样沿着笔直的直线，而是沿着波浪形曲线向前运动（如下图所示，它的位置以每5年的间隔标注出来）。他推断天狼星有一颗暗伴星相伴，它们的共同引力中心（天狼星绕此中心运动）沿着直线前行。"天狼星B"由阿尔文·克拉克在1862年观测到。它相对于天狼星的位置和前进路线也以5年的间隔显示在图中。较小的图展示了天狼星B相对于天狼星的轨道运动。

异常恒星

在太阳周围的空间里——譬如说半径为50光年的球里——更普通类型的恒星是光度比太阳小的恒星。主星序的下端是矮星。在赫罗图中，无论是蓝巨星还是红巨星，都表现得很特出，因为它们尽管相对罕见，但能在非常遥远的距离上被观测到。但是无论罕见还是普通，几乎所有的恒星都落在图中两个主要的星序上，只有很少的恒星是例外。事实上，在罗素画的第一幅绝对星等对光谱型的图中，已经有这样一颗星了：在图的左下角有一颗本身很暗的A型星（见283页），这是波江座一对近双星中那颗较暗的伴星。类似的恒星还有一些。离开太阳大概9光年的亮星天狼星，在与视线垂直方向有相当快速的运动。1844年贝塞尔宣布天狼星的运动是不规则的，它沿着波浪型的曲线前进。最简单的解释是天狼星是一颗双星，带有一颗很暗弱的甚至黑的伴星。二十来年后，美国望远镜制造者克拉克(Alvan Clark Jr)在测试一台新的折射望远镜时，第一次看到了这颗暗伴星，然后在轨道上每50年绕亮主星一周的天狼星伴星被有利地置于观测之下。



这些恒星叫做"白矮星"。因为它们是双星系统的成员，如我们所知，白矮伴星的质量能够被确定下来。结果表明它们是一些"荒谬"的恒星，质量与太阳质量差不多，但大小（从它们的表面温度和测得的亮度推算出）不比地球大多少。这意味着巨大的密度，正如爱丁顿所说的，一吨的物质能够装进一个火柴盒里。1914年前后的情形是个窘境，天文学家们觉得什么东西错了，但不知道错在哪里。解释再一次等待对原子核物理学和恒星内部结构的更好掌握。最后，剑桥大学的福勒（R.H.Fowler）在1926年用新近发展起来的量子物理学理论解释了所谓的高密度简并物质的存在。

1931年，年轻的印度数学家、福勒的一位学生钱德拉塞卡(Subrahmanyan Chandrasekhar)首次计算了这类白矮星质量的上限(后来叫做钱德拉塞卡极限，见337页)。白矮星是对天体的观测先于认识的一个例子。第一颗白矮星发现于19世纪，20世纪早期的观测揭示它们有难以置信的高密度，但他要求新的关于物质状态的物理学理论来揭示它们，来确认观测是正确的，并正确地解释观测。

但是也可能存在另一种发现的途径。1932年查德威克（James Chadwick）在实验室里证实了原子结构中一种新的基本粒子中子。而当时定

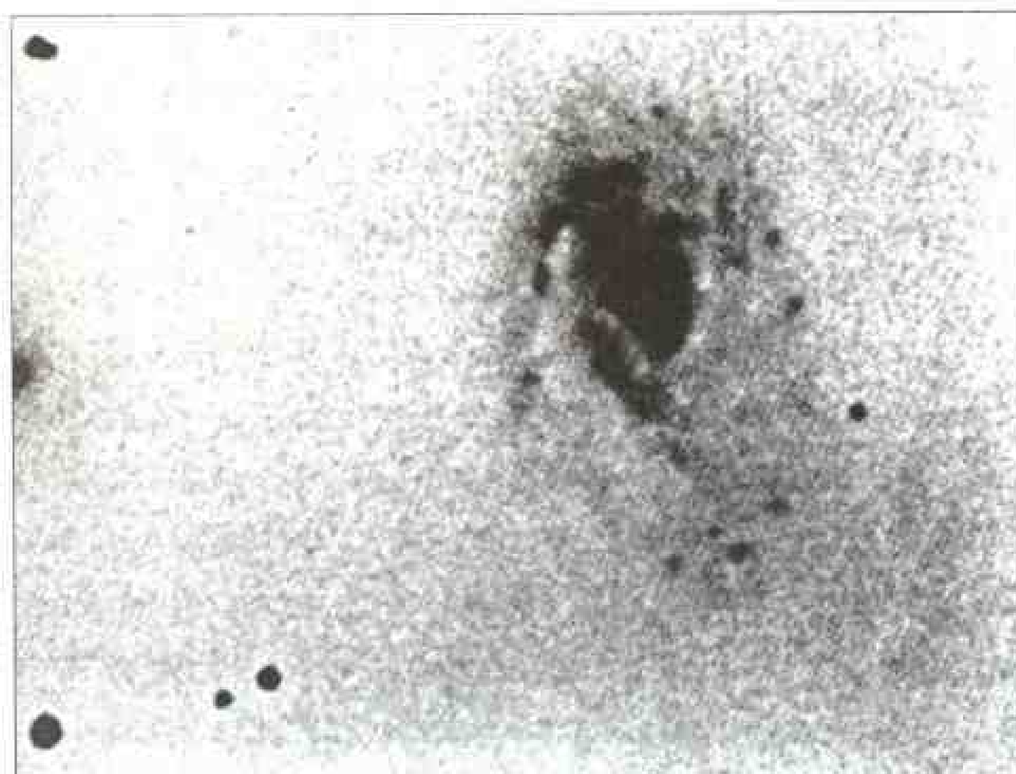
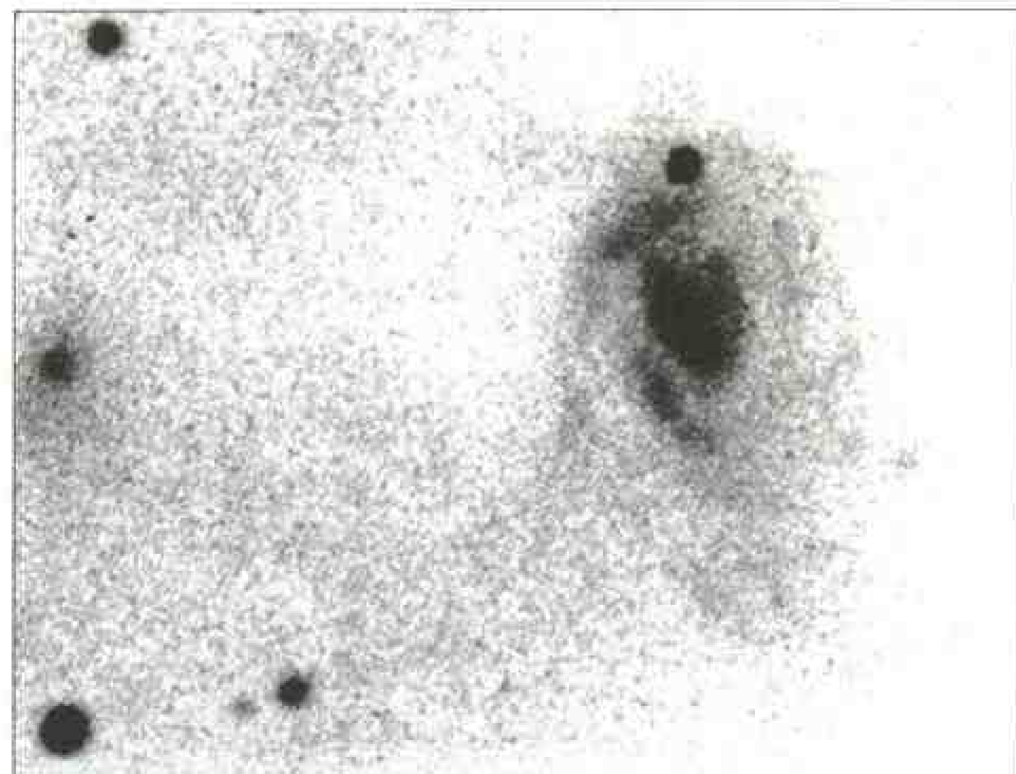
居于加利福尼亚的瑞士裔天文学家兹维基（Fritz Zwicky，1898—1974年）和他的德国裔合作者巴德（Walter Baade，1893—1960年）提出，中子的已知属性允许一种理论上存在的恒星，它们由中子构成，密度甚至是白矮星密度的数百万倍。这一推测发表于1934年，在当时只引起很少人的注意。直到1967年（见337—338页），不是出于一次刻意的搜索，而是在射电天文学不相干的研究过程中偶然发现，这样的天体确实存在。

还有一些其他类别的恒星，它们的本质也曾是谜，后来被恒星内部结构认识的提高所破解。特别地，有一类变星，有特别规则的光变曲线和固定的光变周期，其中肉眼可见的造父一（仙王座δ，见297页）就是一个例子，长期以来它们一直是个问题。美国人沙普利（Harlow Shapley，1885—1972年，见296页）在1914年已经指出，说它们是分光双星的各种解释已经不得不放弃，并设想它们是在脉动着的单个恒星。像爱丁顿这样的理论天文学家发展了这一设想，20世纪的20和30年代里，人们对有关这些恒星的理论进行了更多细节上的推算。对这些恒星观测的结果与理论符合得很好。因为恒星的大小以固定的周期振荡，所以观测到的恒星视向速度（当恒星膨胀时，它的表面向观测者靠近）、它的表面温度、光谱型和视星等，相应地以脉动的周期发生变化。这些了解进一步使天文学家们确信，这些高亮度的恒星在测定大尺度宇宙距离方面有非常重要的应用。

沃尔特·巴德

威廉姆·海因利希·沃尔特·巴德（Wilhelm Heinrich Walter Baade）1893年3月24日出生于德国西北部的希罗丁豪森。他先在缪恩斯特（Münster）大学短暂求学，然后到了哥廷根大学学习，1919年获得天体物理学博士学位。整个20世纪20年代他是汉堡天文台的成员，但其中有一年待在美国，以便在"河外星系"天文学方面处于领先地位的威尔逊山天文台和其他地方，来进一步巩固和完善他在该领域内的工作。1931年他加入了威尔逊山天文台，他的同事中有埃德温·哈勃，弗利兹·兹维基在邻近的加州理工学院。巴德先在威尔逊山天文台工作，后用帕洛玛山天文台的200英寸反射镜工作，直到1958年退休。然后他作为教授回到哥廷根大学，并于1960年6月25日在那里去世。



旋涡星云（星系）中的一次超新星爆发。

左：1931年的NGC4273外观。

右：1936年2月16日，同一个天体。尽管大气条件恶劣、成像质量也不一样，但是在星系核上方可以清楚地看见一颗新恒星。

像新星这样的更为灾变性的变星仍旧是个难题。日常的天空照相观测大大增加了发现它们的概率和有关它们行为的经验知识。从1917年起（见308页）在较大的，或许也是较近的旋涡星云里，发现了大量的与银河系里新星特征一样的暗弱恒星。直到更后来的1934年，巴德和兹维基确定，有两种区别很大的新星类型，一种是普通的，在类似我们所处的这样的星系中，爆发的频率是每年10到20次，而更罕见更显著的超新星，它的光度能够达到星系里所有其他恒星加起来那么亮。1928年哈勃提出一种可能的证认，即金牛座蟹状星云是我们银河系里超新星爆发的气体状遗迹，因为1054年中国的史书中记录了这次爆发。1942年进一步的研究支持了哈勃的证认。但是引起这些恒星爆炸的原因始终是个谜，甚至直到最近，在已经知道了恒星能量的一般来源后，情况仍是如此。

恒星的演化

然而更大多数的恒星没有变化，能够被归类到有限数目的光谱型中（正如我们已经看到的）。在19世纪60年代恒星分类刚开始时，人们就认识到分类一定包含了恒星如何形成和如何从它们的初始状态演化过来的信息。恒星能量来源于开尔文－赫姆霍兹收缩（见本书第258页），对此，在感觉之外很少有物理上的理解，而且事实上不知道恒星的大小和质量，不知道为什么恒星有差别这么大的光谱型，早期试图了解恒星生命历史的尝试只能是猜测而不能走得更远。

有两派主要的观点。一种继承了1865年佐尔纳的设想（见本书第276页），认为恒星形成时是天狼星型——类似天狼星的白热恒星。对这种观点有一些支持，因为人们注意到这类恒星有时有明亮的发射线，但同时也有暗线，说明这类恒星还保留有它们的星云起源的特征。然后恒星开始变凉并收缩，经过类太阳型恒星的阶段，然后成为红色星，进入假想的消亡阶段。这主要是波茨坦天体物理天文台沃格尔所持的观点。

稍后，19世纪80年代晚期，诺曼·洛克耶提出一种更加精致的理论，这种理论建立在两种独特的想法上。第一种是“陨星假说”，这一假说最后在1890年出

版的以此为名的书中得到阐释。认为“所有天空中自身发光的天体都是由大堆的陨石或因热而产生的陨石蒸气组成。”——换句话说，构成恒星的原始物质是大块的岩石，而不是气体。第二种想法在于试图解释，为什么在实验室里，同一种化学元素在电弧（热的）和火花室（更热的）里发出不同的谱线。为此他假设，在高温下，元素分离成他称作“原初元素”（protoelements）的更简单的构成单元。尽管在细节上这两种想法是错误的，但预示了后来被认同的一种观点：在星际空间中有固态物质。洛克耶的“原初元素”与现代原子理论中的离子相似。洛克耶的恒星演化理论从一颗从星际物质中浓缩而来的大而冷的恒星开始。当年轻的恒星收缩时，这些物质开始升温，直到表面的升温与辐射的损失相平衡为止。然后进入最后的冷却阶段。



诺曼·洛克耶的恒星演化理论。这只是一幅演示图，但可以看作图中从左往右恒星的温度升高、年龄增大。恒星从起初左边底部的一些流星物质，增加到顶部的最大温度，然后下降到最后的低温、致密状态。光谱型对应于塞奇的或沃格尔的光谱型，分类也标明在其中了。

下一代的天文学家们，包括赫兹普隆和罗素，很快看到最早的赫罗图所表明的（见283页）巨星和矮星之间的区别，这给恒星的演化提供了新的重要线索。在1914年一篇半普及的文章中，罗素也包括其他人，接受了恒星的能量来自收缩的说法，所以恒星演化是朝着密度增加和体积减小的方向进行。恒星形成时是光谱型为M的红巨星，然后逆着光谱型的次序沿着巨星序朝温度增加方向移动到A型或B型，然后沿着主星序向下，顺着光谱型的次序，到达冷的M型矮星。虽然是基于不同的建立得更完备的一套数据，罗素的恒星演化理论与洛克耶的理论也有一些相同的特征，譬如，恒星在它生命的中期最热的断言。罗素的理论既简单又与观测符合得很好，所以被广泛地接受了。

但是，当一些我们已经提及的有关恒星大气、恒星结构和质光关系等新观点出现时，罗素的理论在10年之内就步入了困境。1926年罗素提出了一个不同的理论，但这个理论因更具推测性而缺少证据的支持。然而这理论确实包含了一个关键的新想法：恒星的寿命取决于它的初始质量，这一质量在恒星的演化过程中基本上不变，而恒星并不是被迫沿着巨星序和主星序移动，而是能够穿越它们。巨星序和主星序只是恒星保持稳定的结构从而度过生命中有意义阶段的停留之处。赫罗图的一些区域没有恒星，只不过意味着恒星非常快速地度过这种光谱型和亮度的组合，因此在任一时刻，极大多数恒星处在赫罗图中的巨星序和主星序区域。

对不同初始质量恒星生命历史的完全理解，只是缓慢地形成于1926年罗素的直觉性理论和1939年贝蒂把核能作为可接受的能量来源的建议。即使在今天，这个问题在细节上也还没有解决，一些地方一直存在着不确定的一面，譬如，关于球状星团中据信是最老的恒星的年龄问题。但是大约到1960年，人们已经了解了这个被弄得非常复杂的问题的主要轮廓，此后的改变只是细节上而不是根本上的了。

银河系的结构

在1785年试图建立银河系结构的尝试中（见229页），威廉·赫歇尔向早期的探索者一样，认为银河是由于我们身处在一团恒星中而产生的视觉效应。但是他为确定这团恒星的外观而付出的努力遇到了重重困难。

约翰·赫歇尔进展得也不多。从好望角看见的银河给他留下很深刻的印象，他曾设想银河的结构，中央恒星聚集成一个薄盘状，四周围绕着由恒星聚集成的蜿蜒长臂，这个总的形状使他很感困惑。

19世纪40年代，罗斯勋爵的大反射望远镜揭示了一些星云的旋涡结构（见本书第242页）。银河系本身可能是否也是个旋涡？有点奇怪的是，约翰·赫歇尔从来没有提出过这种可能性，但是在1852年，供职于普林斯顿大学前身的斯蒂芬·亚力山大（Stephen Alexander，1806—1883年）教授发表了一篇《银河系——一个旋涡》的讨论。在被罗斯确认的第二个旋涡星云M99中，四条分支从中央星团蜿蜒而出。亚力山大争辩道，如果太阳和其他亮星构成类似一个旋涡星系的中央星团，而又合适地选择四个分支的轨迹，那么太阳系的居民将看到一个与我们在地球上确实已经看到的非常相近的夜空。

对他的同时代人来说，亚力山大的模型里有了太多的新设计，所以它的大部

恒星的生命历史

根据赫罗图的框架，大部分恒星的生命历史可以总结为四个阶段：

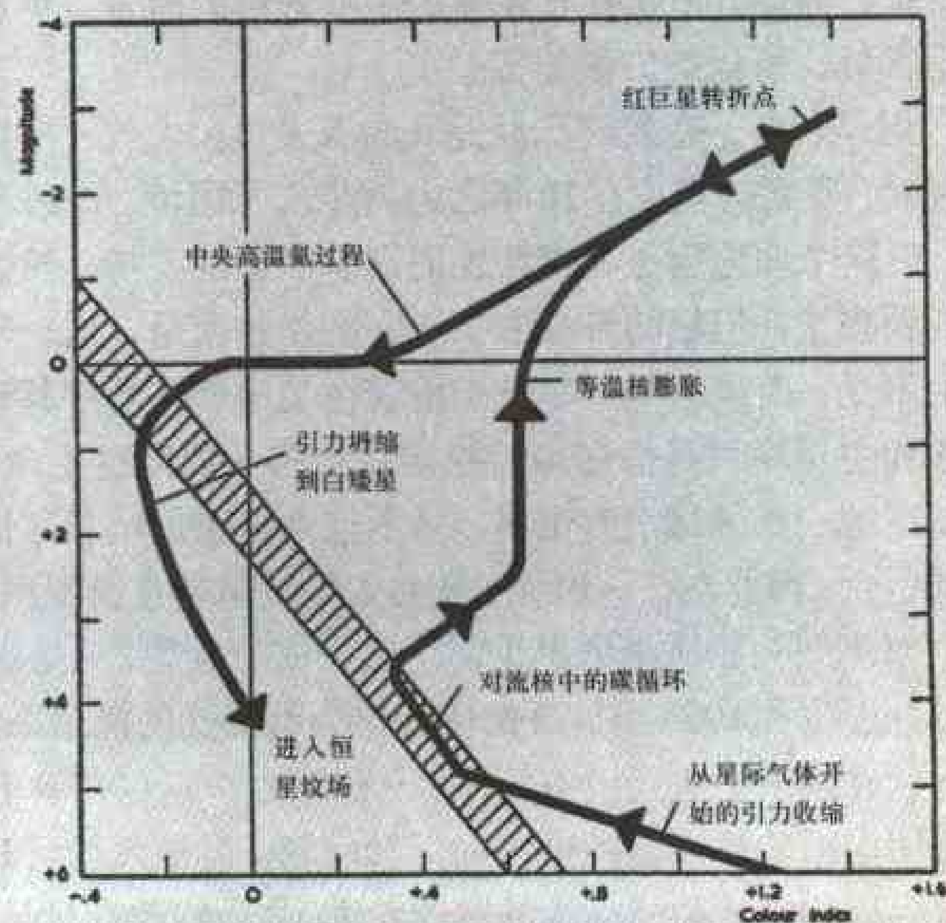
1 从星际物质浓缩成恒星，并相当快地形成稳定的结构，进入主星序。恒星质量越大，亮度也越大，它的光谱型也越早（譬如说是F型而不是M型）。

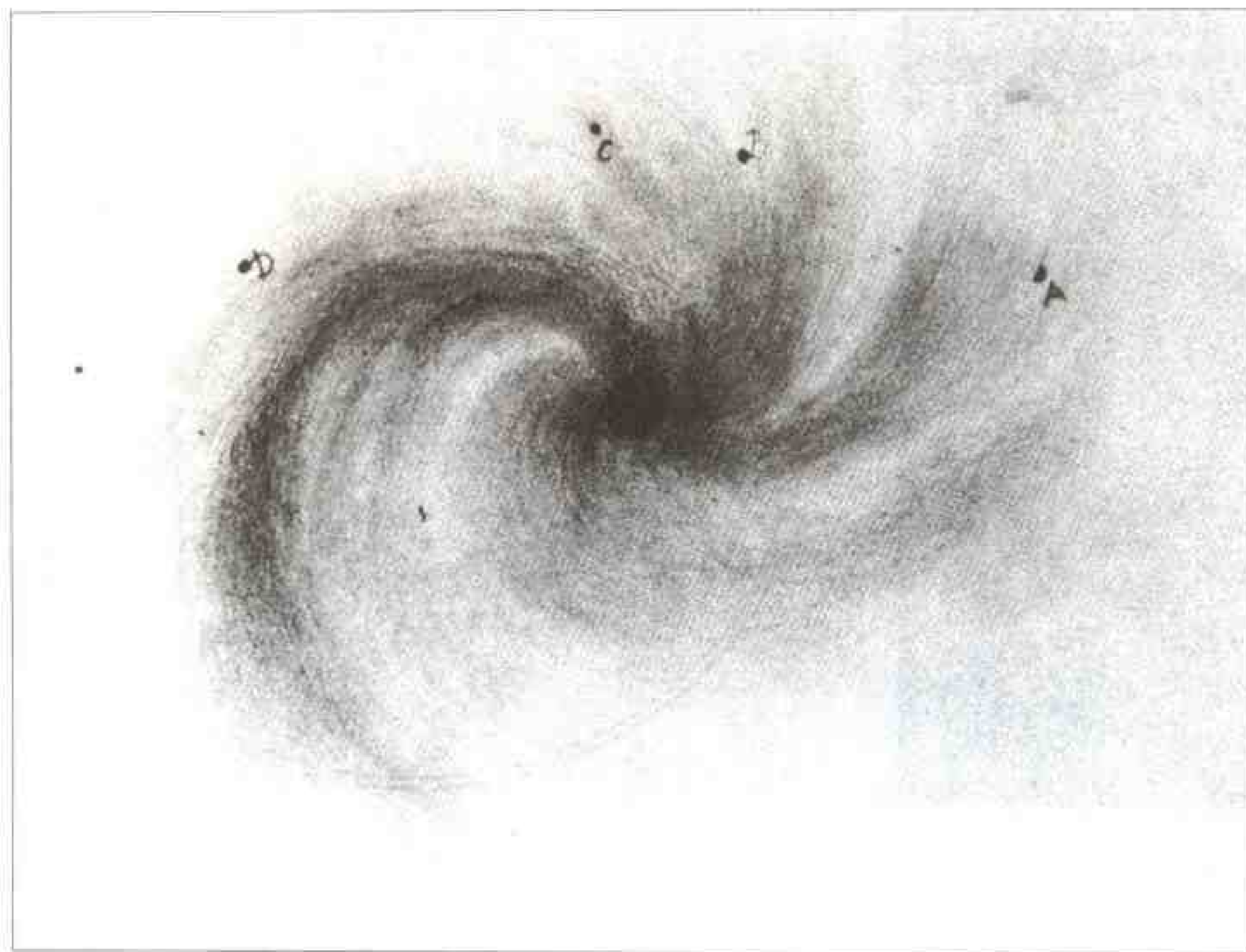
2 恒星在它的稳定结构上度过大部分时间，通过在内核从氢转化为氦而释放能量；恒星质量越大，演化就越快。

3 当内核的氢耗尽时，恒星很快地“移”到赫罗图上的巨星支，那时恒星的能量由氦核进一步转化成更重的元素来提供。

4 最后当恒星能源全部耗尽时，恒星演化的轨迹穿越赫罗图的主星序，到达左边，坍缩成白矮星。

对于质量很小，也许只有十分之一太阳质量的恒星，演化的过程进展得很缓慢，以致即使是最老的恒星也还只处在第一阶段；另外一方面，质量最大的恒星以非常快的速度演化，它们的整个生命只有几百万年而不是几十亿年，它们最后坍缩阶段的标志，是像超新星爆发这样的极端现象和像形成中子星这样的奇异天体。该图由巴特·博克绘制，按照1958年人们掌握的知识，它展示了一颗质量略大于太阳的恒星的演化。后来，该图所依据的理论只在细节上有所修正。





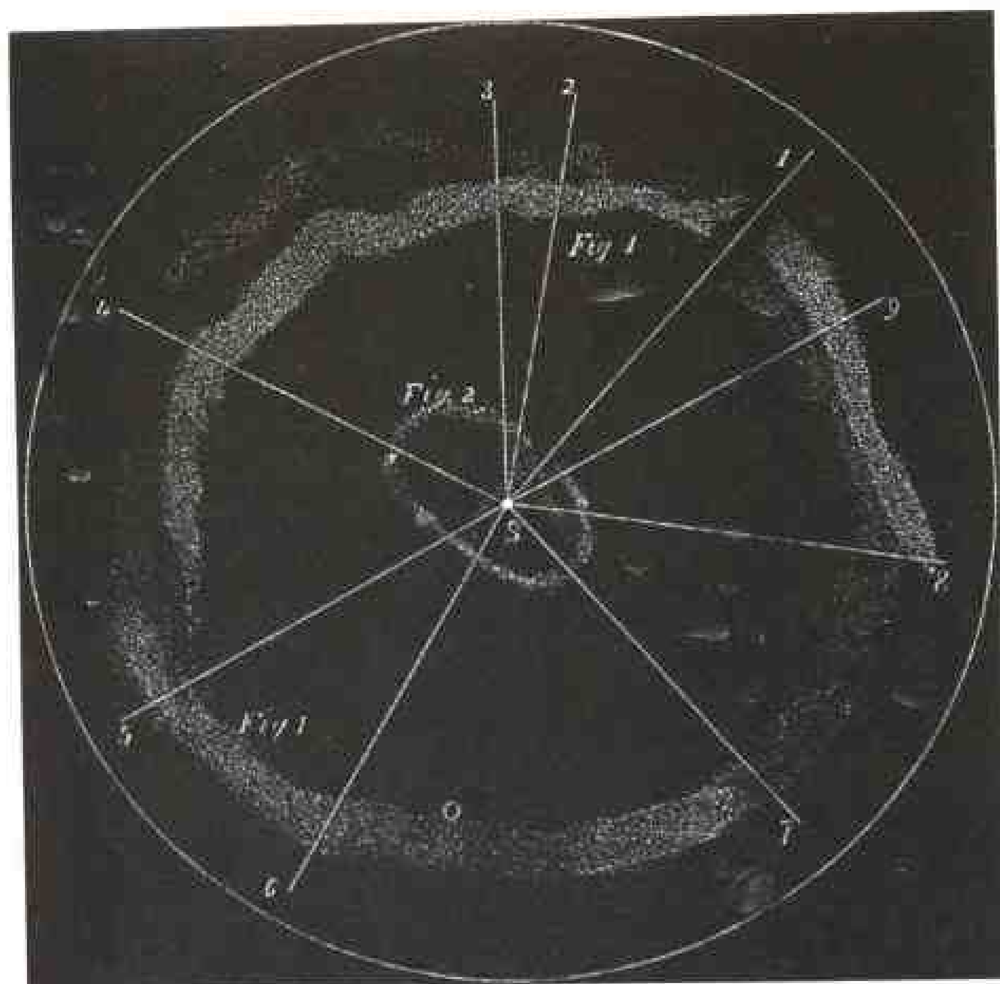
罗斯爵士的后发座M99草图，1848年他辨认出这个星云的旋涡结构。尽管罗斯认出第一个旋涡星云之后过去了三年，由于这三年爱尔兰经历了可怕的土豆饥荒，那架大反射镜一直闲置未用。

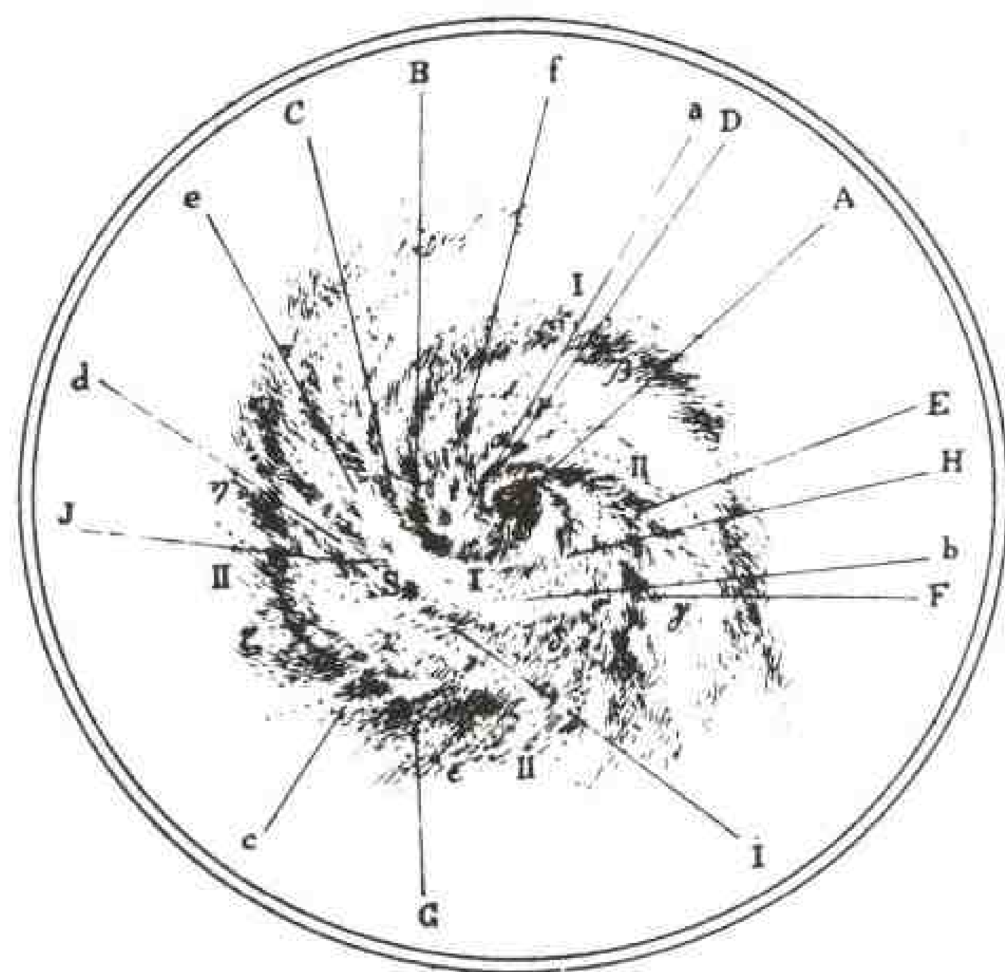
分被人们遗忘了。但是随着旋涡星云以前所未有的数目被发现，银河系有旋涡结构的可能性不可避免地一次又一次地被人提出来。特别著名的是荷兰记者、业余天文学家埃斯顿（Cornelis Easton，1864—1929年），他在世纪之交出版了一系列有影响的银河系素描图，画出了俯视下的银河系结构。

另一位力求复原所观测到的银河的复杂细节的是受人尊敬的英国业余天文学家、科普作家普罗克特（Richard Proctor，1837—1888年）。他的1869年的模型被如此评论道："像一个弯曲的断裂的环，有一些长长的丝带一样的尾巴，绕回到每一侧的开始处"。许多天文学家发现这个模型过分复杂了，所以对此不满意。

更少吸引人注意的——不过是由于相反的原因——是斯特鲁维1847年提出的模型，该模型建立在对威廉·赫歇尔的恒星计数和稍后星表的统计分析基础上。他设想了一个无限延伸的宇宙，有一个中央平面（也是银河系的中央平面），其中恒星均匀地以相同的集中度分布在各处。在中央平面的两边随着离平面距离的增加，恒星的密度系统地减少。为了解释他的无限宇宙模型和可观测宇宙中有限恒星数目之间的差异，斯特鲁维用到了遮蔽物质，这些物质遮挡了很遥远的恒星使它们看不见。

但是尽管人们认为斯特鲁维在强求真实的恒星系统统一到他的模型中去方面走得太远了，许多天文学家同意，从太阳系开始系统地向外先考察较近的恒星然后考察更远的恒星，这点是正确的。他们希望这能够允许他们来估计那些能在望远镜里被一个个看到的恒星所构成的系统的范围，他们期望银河之谜也能自然而





里查德·普罗克特(Richard Proctor)的银河系主要特征草图(标注了图1)、和他在19世纪80年代的最后尝试(标注了图2),来解释银河系显示出这样的结构的原因。例如在银河中观测到一个分叉(图1中的9),可能是星系内折重叠引起(在图2中、太阳S附近,沿着直线S9)。

考纳利斯·伊斯顿(Cornelis Easton)1900年绘画局部,展示了他归予我们银河系的旋涡形状。他用字母来演示他的解释、如果按照所绘的形状,银河系的各种观测特征将如何形成。

解。因此,在19、20世纪之交,当后来的普林斯顿大学教授杨(C.A. Young,1834–1908年),写出他的教科书《天文学手册》时,一种舆论已经出现在更保守的头脑中。极大多数恒星处在宇宙空间中一个圆盘内,圆盘的直径是它的厚度的8到10倍,测得它的半径至少在10000到20000光年。在垂直于圆盘面的方向上恒星分布得很稀疏,最后到达星云的区域。“至于银河本身,恒星是构成一个薄平面连续的片状结构,还是排列成环状或旋涡装,以及太阳是否位于一个相对空旷的空间之中,关于这两点还是不能确定。”

卡普坦的“选区计划”(1906年)

连续的薄片、环、还是旋涡?带来这种不确定性的理由是很明显的,即当我们想勾画银河系的整体时,我们在银河系中的位置对此带来了严重的不便。一些天文学家——尤其是慕尼黑天文台台长西利格(Hugo von Seeliger,1849–1924年)和荷兰哥龙尼根大学教授卡普坦(J.C.Kapteyn,1851–1922年)——认为接下来的可靠方法是逐个地对可见恒星进行全面的研究。问题是关于这些恒星所需的数据——它们在天空中的位置、视星等和自行等——积累得太慢了。

如我们已经所见的(本书第280页),根本的问题是只有非常近的恒星,它们的距离才能用直接的三角测量法确定,分光视差的方法还有待未来的发明。然而,较近的恒星有较大的自行,这一原则在总体上必定是对的。如果能够获得足够多的自行资料,那么在统计上可以应用这一原则,来给出一个达到更深远太空的测量标杆。

如何获得必需的数据?显然现存的天文团体没有足够的人力对整个天空按照所需要的细节程度做全面的勘察。但是通过选定天空中有代表性的样区可以把整个任务降级到易于操作的比例,然后把这些观测任务分配给很多天文台。1906年

J.C.卡普坦



雅可比·考纳琉斯·卡普坦（Jacobus Cornelius Kapteyn）1851年1月19日出生于荷兰巴纳维德（Barneveld），是15个孩子中的一个。他在乌特利希特（Utrecht）大学取得物理学博士学位，然后在莱顿天文台获得一个职位。27岁那年，他成为哥廷根大学的天文学和理论力学教授，并在这个岗位上一直工作到他70岁退休。

因为在哥廷根没有大的望远镜，卡普坦认识到前进的办法是通过各地同行的合作。在一个附近监狱里的囚犯的帮助下，在1886年到1896年间，卡普坦和他的同行们测量了戴维·吉尔在好望角拍摄的南天底片上的近五十万颗恒星。1906年他打算用他的"选区计划"来探索银河系，重新召集了世界范围内的天文学家用他的方法来收集数据。虽然第一次世界大战破坏了对于完成这项计划很关键的合作精神，但是天文学家们在随后的50年里继续优先考虑卡普坦选定的天空样本区域。

卡普坦于1921年退休，次年6月18日在阿姆斯特丹去世。

卡普坦发表了他的《选区计划》，并且他设法说服了世界范围内的天文学家，把他的计划变成国际采集数据运动的基础。

但是有一个可能存在的障碍。这个方法涉及对自行和视星等的分析，并假定视星等是可靠的——它们没有被潜藏在星际空间的遮光物质扭曲和减弱了星光。这个问题被那些参加的人员意识到，但那个时候对可能的遮光证据的疑虑似乎在被打消。然而最终人们将发现，在银道面上确实存在着尘埃，它们的数量多到不仅影响近处恒星的视星等，还遮挡了银河系的很多要检查的部分。因此，卡普坦和他的合作者们把他们自己局限在了银河系里一个本地区域里，而银河系的极大部分躲藏在了他们的视野之外。作为一个结果，他们的研究看起来确认了一个普通的观点，即太阳位于银河系近中心的地方，测得的银河系直径在几千光年。

当这一项艰苦的工作正在进展时，一位大胆的年青天才出现在了美国天文学舞台上。1914年哈罗·沙普利加人了洛杉矶附近威尔逊山天文台的研究员行列。他新近与哈佛大学天文台的贝利（Solon I.Bailey）讨论过他的未来研究计划。勒维特（Henrietta Leavitt，1868—1921年）也是哈佛天文台的研究人员，她最近几年的工作包括了对小麦哲伦星云照片中变星的艰难细查，这些照片拍摄于在秘鲁的哈佛南方天文台。通过检查一套照相底片中的差异来确定一颗变星是一件事情，来确定变星的周期——两个最大亮度之间的天数——是更加困难的另一件事。然而尽管任务是繁重的，但努力是特别有价值的，因为小麦哲伦星云中的天体大致处在离地球同样远的距离上。因此视星等的差异对应于绝对星等（光度）的差异。

1908年勒维特小姐发表了一个研究报告，列出了小麦哲伦星云中1777颗变星，她能够确定其中16颗变星的光变周期。她评注道：光变周期越长的恒星也越亮。四年后16颗的数目增加到了25颗，勒维特小姐也发现了联系周期和视星等——因此也就是光度之间的数学关系。这个"周光关系"在天文学史上有着重要



哈罗·沙普利

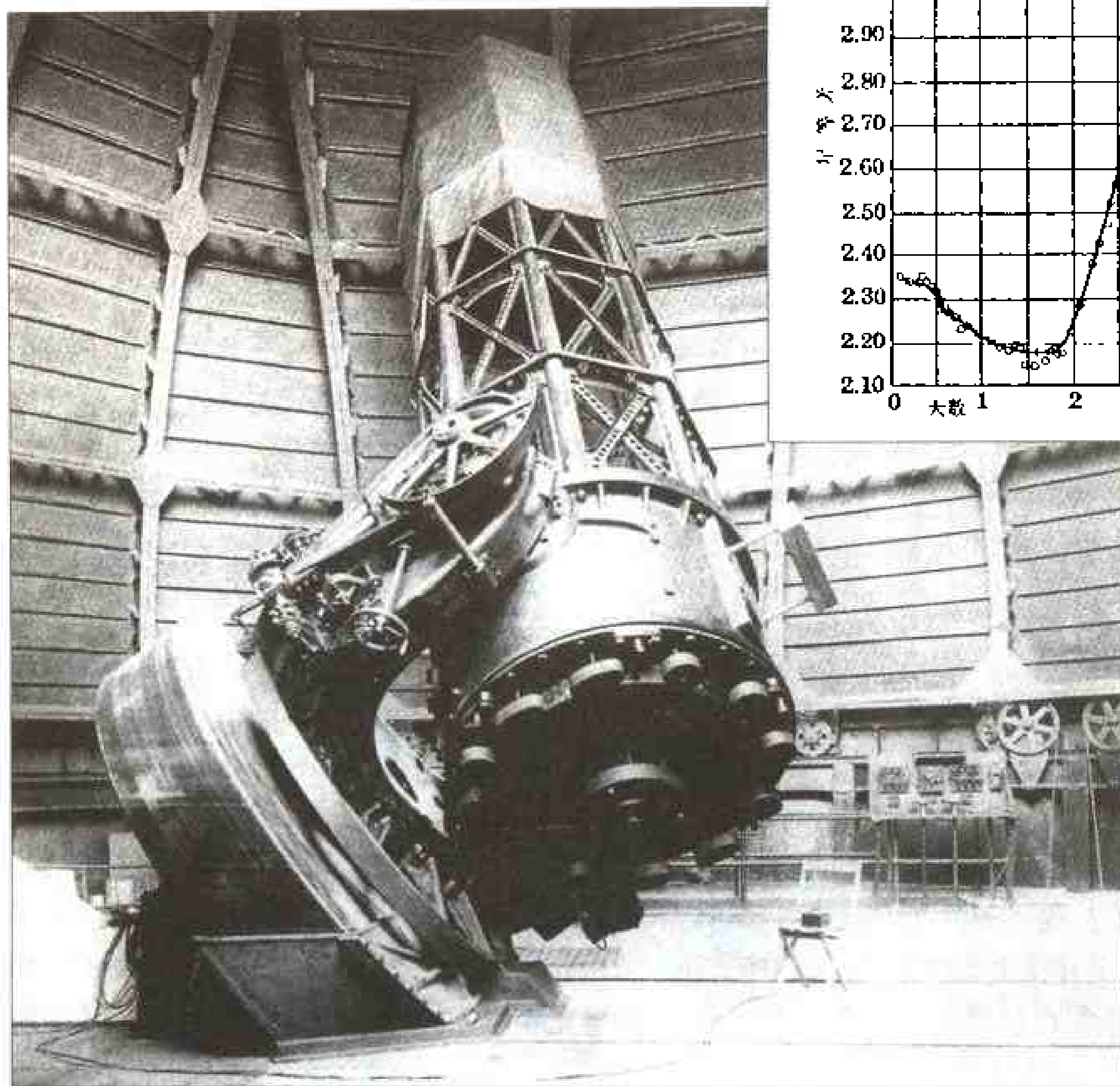
哈罗·沙普利1885年11月2日出生于密苏里的纳什维尔（Nashville），在恢复他的学业前曾经当过记者，1911年他获得一个普林斯顿的职位，跟H.N.罗素一起研究食双星，1914年被G.E.海耳招募到威尔逊山天文台。他在威尔逊山天文台作为实测家和出色的理论家的生涯，因1921年哈佛大学天文台对他的聘用而被中断，当时哈佛天文台台长职位正告空缺。罗素此前拒绝了这个职位，沙普利却对此觊觎颇切。到了哈佛天文台数月之后，沙普利被任命为该天文台台长。他在那里营造了一个刺激性的氛围，一直到他1952年退休。他到该天文台不久便在国际科学界扮演了重要角色。他于1972年10月20日在科罗拉多的波尔德（Boulder）去世。

的地位。

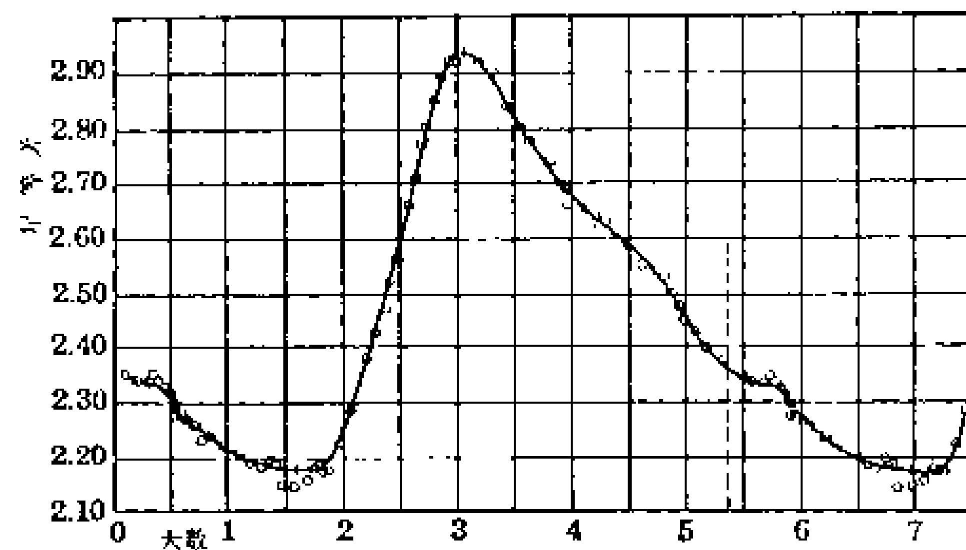
那些尚有疑问的变星中（沙普利所说的脉动星——见289页），有一类它们的光度会迅速达到最大值，然后在数天之内慢慢衰减，这种变光行为以仙王座δ（造父一）为典型，而早在1784年古德里克就发现了造父一的变化。这类“造父变星”很亮，因此很显著，而它们的有特征的光变曲线也使得它们比较容易被确认。它们在一团恒星中显得很突出，就像灯塔在港口的房屋和路灯中显得很突出一样。对于研究远距离暗弱天体而言，威尔逊山的60英寸反射望远镜是世界上最有力的望远镜，贝利——他本人就曾经成功地在一些球状星团中辨认出一些造父变星——建议沙普利用60英寸反射望远镜继续这项工作。

球状星团是一种显著的天体，数百成千的恒星聚集成球状。1677年哈雷在圣赫拉拿岛时曾经看到过最亮的球状星团半人马座ω（见239页），赫歇尔父子在扫描星云时发现了更多的球状星团。正如约翰·赫歇尔所记下的，非常奇怪，球状星团不是均匀地分布在天空中。它们的极大多数只占半边天空，而略少于三分之一的球状星团都集中在人马座区域，该区域也包含了最多的银河系星云。1909年瑞士天文学家卡尔·博林（Karl Bohlin）曾经提出球状星团围绕银河系中心构成一个系统，银河系中心在远离太阳的人马座方向。但是宇宙学的预见很难被认同，很少有人认真地对待博林的想法。

测量难以置信的遥远的球状星团的距离似乎是一场无望的追求。但是足智多谋的沙普利看到了一个解决这个难题的方法。假设勒维特小姐给出的小麦哲伦星云中造父变星的周光关系对球状星团中的造父变星也成立，那么一个球状星团中一颗给定周期的造父变星跟另一个球状星团中一颗同样变化的造父变星具有相同



威尔逊山天文台的60英寸反射望远镜，在1908年到1917年间是世界上最大的望远镜。枚伦·贝利推荐年轻的哈罗·沙普利到那里找到一个研究职位，因此他能够用这架反射望远镜寻找造父变星和其他类型的变星。



仙王座δ（造父一）的光变曲线，造父变星的原型。一颗造父变星的光变周期，开始时亮度迅速增加，然后慢慢下降。亨雷塔·勒维特发现证据

这件事情说起来容易做起来难。即使是在用60英寸反射望远镜拍摄的照相底片上，球状星团中的单颗恒星，如果确实能够看得见，也是非常暗弱的。要认定一颗星是造父变星，并确定它完成从最亮到下一个最亮这个周期所需要的天数，需要有许多这样的照相底片。在一颗年青人的雄心驱使下，沙普利夜以断日地工作，直到他确认了一打最近的球状星团中的造父变星的周期。

然后他进入下一个问题。在更远的球状星团中，造父变星太微弱了以致无法再看见。然而沙普利注意到，任何一个球状星团中最亮的恒星与另外的球状星团中最亮的恒星在亮度上是接近的。他把这个作为另一个同一性假设的基础，这个假设把他从他能看见造父变星和最亮恒星的球状星团，带到了他只能看见最亮恒星的星团。

最后，在甚至最亮的恒星再也无法分辨的距离处，沙普利又做出了另一个假设，认为球状星团本身也是相同的。因此，通过比较一个遥远球状星团的视直径与一个已知距离球状星团的视直径，可以得出前者的距离。

通过这一连串大胆的步骤，1917年沙普利得到最远的球状星团的距离大约为200000光年。这是人们公认的整个银河系直径的好几倍。如此遥远而又显示出一种有意义的形状，球状星团本身必定也很巨大，也许（沙普利起初认为）球状星团跟银河系本身差不多大。

但是为什么球状星团集中在人马座方向？为什么它们成系统地分布在银道面的两侧？是不是可能如十年前博林所怀疑的那样，银河系比以前设想的要巨大得多，它的中心远远地位于人马座方向，还是在球状星团系统的中心？如果这样，那么银河系的直径必定是令人惊愕的300000光年，而它的体积要比其他天文学家所相信的大1000倍。

对比于“选区计划”的实践者们艰苦地研究近到足够看得见的恒星的路子，沙普利则从一个球状星团到另一个球状星团，向太空中越跳越远。1918年他所宣布的银河系模型，对他的同时代人来说太大胆了。对他们中的大多数来说，球状星团只分布在天空的一侧——这个导致沙普利得出大银河系的事实——只是一个在其他方面都很一致的图像中的一个单个的异常现象。

沙普利看到他成了现代的哥白尼，他废黜了人类，把它流放到了银河系的边缘。但是这样的流放几个世纪来已成了家常便饭，而没有产生任何问题。如果说有什么问题的话，他对银河系直径大小的估算倾向于把人类特殊化（所以增加了认同的难题），因为他把我们的银河系体积增加了1000倍，沙普利把银河系结构变成了已知宇宙的主要构造。

绕银河系中心的轨道运动

1925年瑞典天文学家林德布拉德（Bertil Lindblad，1895—1965年）考虑了在太阳远离银心的沙普利银河中，观测到的恒星运动所带来的结果。在太阳系中，在轨道上运行的内行星不仅比外行星更近，而且还有更大的空间运动速度。同一个动力学规律也可运用到恒星上去。假设沙普利是对的，太阳不是位于而是远离银河系的中心，银河系的稳定性要求太阳和邻近的恒星都要绕银河系中心作轨道

运动。这样，由于动力学的原因，在太阳轨道内侧的恒星将跑得更快，所以会超过我们，而太阳轨道外侧的恒星将落后。所以从太阳系看去，内侧恒星似乎向一个方向运动（因为它们快速赶超我们），而外侧恒星向相反方向运动（因为它们落后于我们），在朝向（或远离）银心的方向上，恒星距离我们越远，它的视速度就越大。

这个理论模式能够很容易地被转换成一对等价的模式，一个是跟视线垂直方向的运动（一个又一个世纪积累起来的“自行”），另一个沿着视线方向的运动（星光光谱分析揭示的视向速度）。演示这样的运动模式实际上在所观测到的恒星运动中的存在，要求艰苦的工作。这项工作主要由莱顿大学天文台的奥尔特（Jan Oort，1900 － 1992 年）完成。

奥尔特发表于1927年的结论为沙普利提供了一个有价值的支持。他们两个都相信太阳位于远离银心的位置上。但是因为奥尔特研究的是比沙普利的球状星团更近的恒星，他的数据受遮光效应的影响更小，所以他得出的银河系大小比沙普利的明显要小。

一个有目共睹的难题：星际空间的暗物质

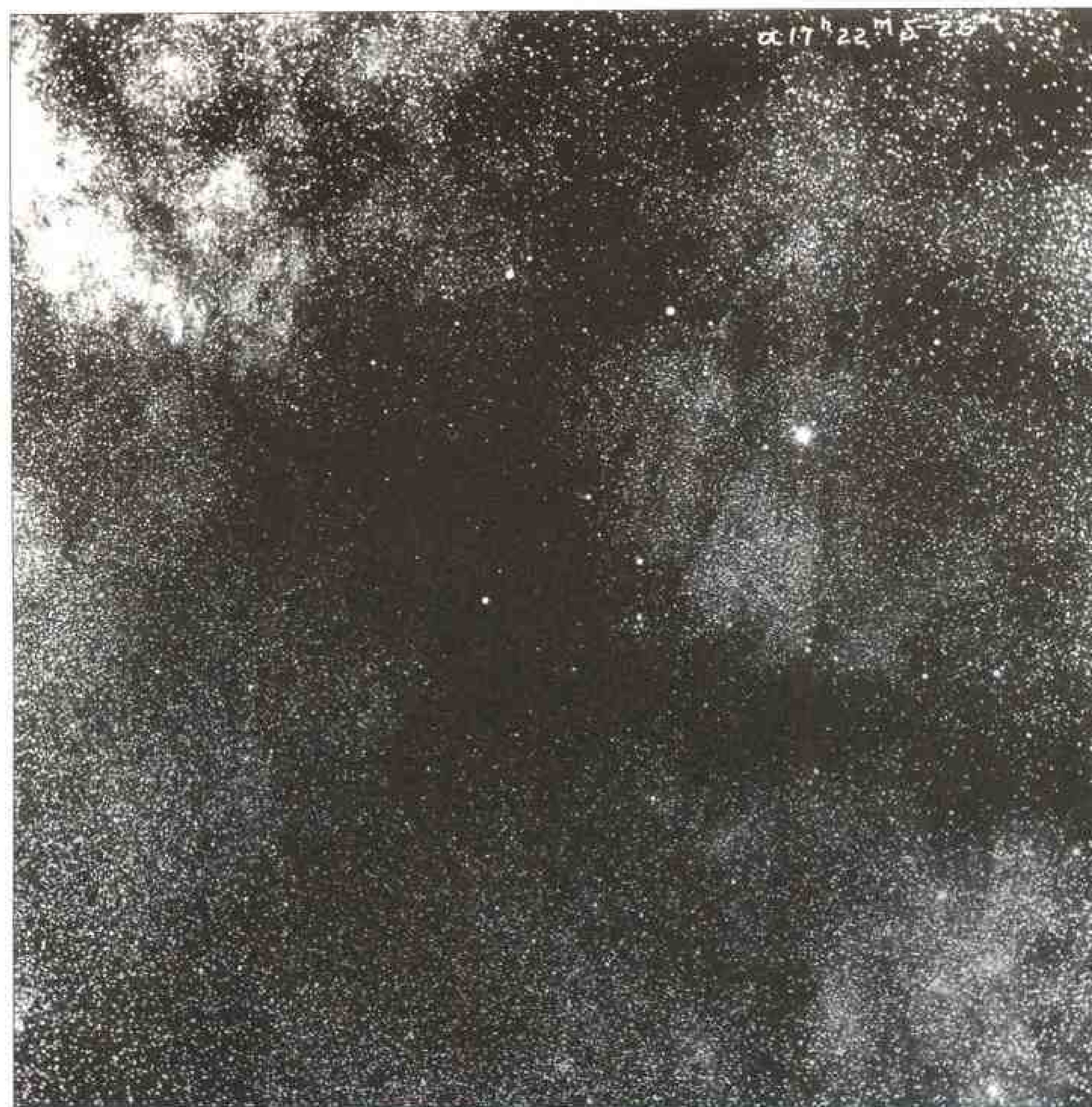
对两种结果的差异的解释不久就来到了。利用照相术来测绘天空，迅速地增加了发现于银河系中的像猎户座大星云这样的不规则气态星云的数目。它们被当做空间中单个的天体，并被命名和给予星表编号，在星图上绘出了它们的位置。光谱观测显示它们是由炽热的气体组成。

1913 年人们认出了一种新型的星云。1859 年坦普尔（Wilhelm Tempel）发现昴星团中的昴宿五被一团星云状物质围绕着。后来的照相观测显示，所有球状星团中的恒星都与一种不寻常的纤细条状的暗弱星云有某种联系。1912年洛韦尔天文台的斯立弗（V.M.Slipher）拍摄了这种星云状物质的光谱，很惊讶地发现它有带着暗吸收线的连续光谱，很精确地模仿了恒星的光谱。显然星云由尘埃微粒组成，反射了恒星的光。不久发现了更多的亮星附近的“反射星云”。

大约同时，利克天文台的巴纳德（E.E. Barnard，1857–1923年）正在用广角肖像摄影镜头拍摄银河系各区域的壮观图片。这些图片显示出一个复杂的恒星的云状结构，在一些裂缝和空洞处很少有或几乎没有恒星。起先巴纳德相信这是恒星的真实分布，但是当他继续工作下去时，他几乎是很不情愿地承认这些是真实的星云，它们不是发光的气体而是暗的遮光物质。在他1927年发表的两册照相星图中，他收录了一个表，列出了一些较显著的暗星云。

一些天文学家不情愿接受这一点，即亮星云和暗星云可能意味着气体和尘埃是星际空间中一种更普遍的物质基底。一般的观点认为，星云是一些孤立的天体，广袤的宇宙空间是巨大、空旷和相当透明的。星云，尤其是致吸尘，会减弱遥远恒星的光线，进一步使确定它们的距离和固有亮度变得复杂，如果这样的星云达到一个有效的数量，后果将是非常严重的。确实，它几乎就是这样一个问题，它太大了，让人不能想下去。爱丁顿有一次评论道，天文学家就像那个拒绝睡在据说是在闹鬼的屋子里的客人，客人的解释是：“我不相信有鬼，但我怕鬼”。





蛇夫座θ附近的银河天区。E. E.巴纳德摄于1905年。

包裹于星云之中的昴星团。根据叶凯士天文台1901年拍摄的一张照片复制。

银河系中轴面存在着一层遮光物质的证据现在看来是毫无疑问的了。1869年普罗克特（Richard Proctor）通过艰苦的工作，把约翰·赫歇尔列出的4000个“不可分解”的星云绘制到天图上，表明在靠近银河的天区包含很少量的这些星云。大多数的这些星云后来被证明是旋涡状的。利克天文台的柯蒂斯（Heber D. Curtis，1872—1942年）在1920年跟沙普利的大辩论中（见309页）争辩道，从侧面看到的旋涡星云至少有一条外围的暗物质带，如果我们星系有这样一条暗物质带就可以解释为什么旋涡星云看上去都远离银河（见本书第307页）。

使得天文学家们确信此事的是另一位利克天文台的成员特伦普勒(Robert J. Trumpler，1886—1956年）耐性工作的成果，他的观测结果直到1930年才发表。特伦普勒多年来一直致力于几百个疏散星团的研究，这些疏散星团被限制在离银道面相当近的区域里，其中毕星团和昴星团是最近的两个例子。他起初按照它们的结构特征的相似性和赫罗图特征的相似性把这些疏散星团分成组型。在一种组型中，不同星团的相对距离可以用两种不同的方法测算而得。一方面在所有疏散星团中，光谱型为，譬如F型的主序星，具有相同的绝对星等。任何两个观测到

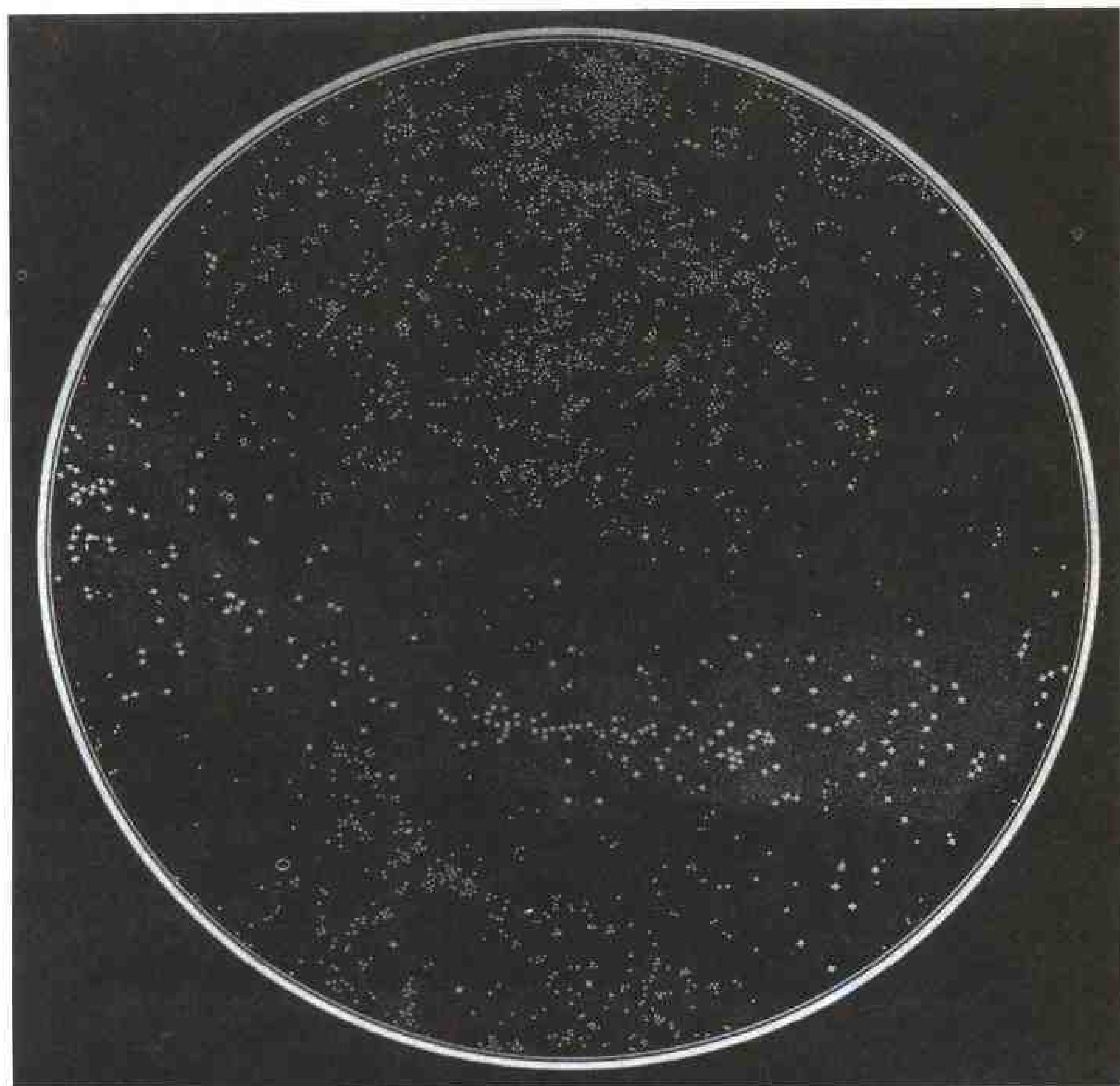
的疏散相同的恒星视星等的差异越大，意味着这两个星团的距离差异也越大（"越暗越远"法）。另一方面，对于大小相同的星团，它们在天空中的角直径也是它们距离的度量（"越小越远"法）。

两种方法没有给出一致的结论：视星等法给出的距离大于角直径法给出的距离，因为星光在通向地球的途中被减弱。这说明存在一种在所有波长上的普遍吸收。

特伦普勒还研究了选择吸收现象。如果尘埃微粒尺寸和光的波长相当，在视线方向上蓝光的散射比红光强，恒星看上去要比它的光谱型所显示的要红（正是这个原因落日看上去是红的）。这使得在测得的恒星"色指数"上要加上一个"色余"量。靠照相的方法测定色余的数量是很困难的，只有到1950年，当测量恒星亮度的光电方法被广泛应用后，色余的测量才成为修正星际尘埃影响的有力武器。特伦普勒在1930年的论文中总结他的发现时写道：

> 我们因此得出结论，在我们的银河系中发生着一些普遍的和选择性的吸收，但是这种吸收限制在相对较薄的一层，它沿着星系的对称面或多或少地均匀地延伸。

没有新的发现来改变这种观点。特伦普勒得出一个银河系各个方向平均的普



北半天球的星云（以点表示）和星团（以十字表示），根据约翰·赫歇尔1864年星表中的条目，由里查德·普罗克特和希德尼·沃特斯于1873年绘出。星团极大多数在银河内或靠近银河，而星云明显地不出现在这个区域。星云出现在天空中某些区域而不出现在另一些区域，这个现象已由威廉·赫歇尔、约翰·赫歇尔和其他人提到过，但是，是普罗克特首次，后来是普罗克特和沃斯特一起，用绘制好的星图，图示说明银河是星云"避免出现的区域"。




詹姆斯·凯勒（James Keeler）1899年在利克天文台拍摄的NGC7814（左侧远端），和C.D.佩林（Perrine）1901拍摄的NGC4565（左侧）。在凯勒英年早逝之后，1910年赫伯·柯蒂斯被委以重任，星云照相研究在利克天文台重新兴起。根据这些和类似的显然是从侧面观测旋涡星云的照片，柯蒂斯惊讶于这些星云平面上的暗物质带。

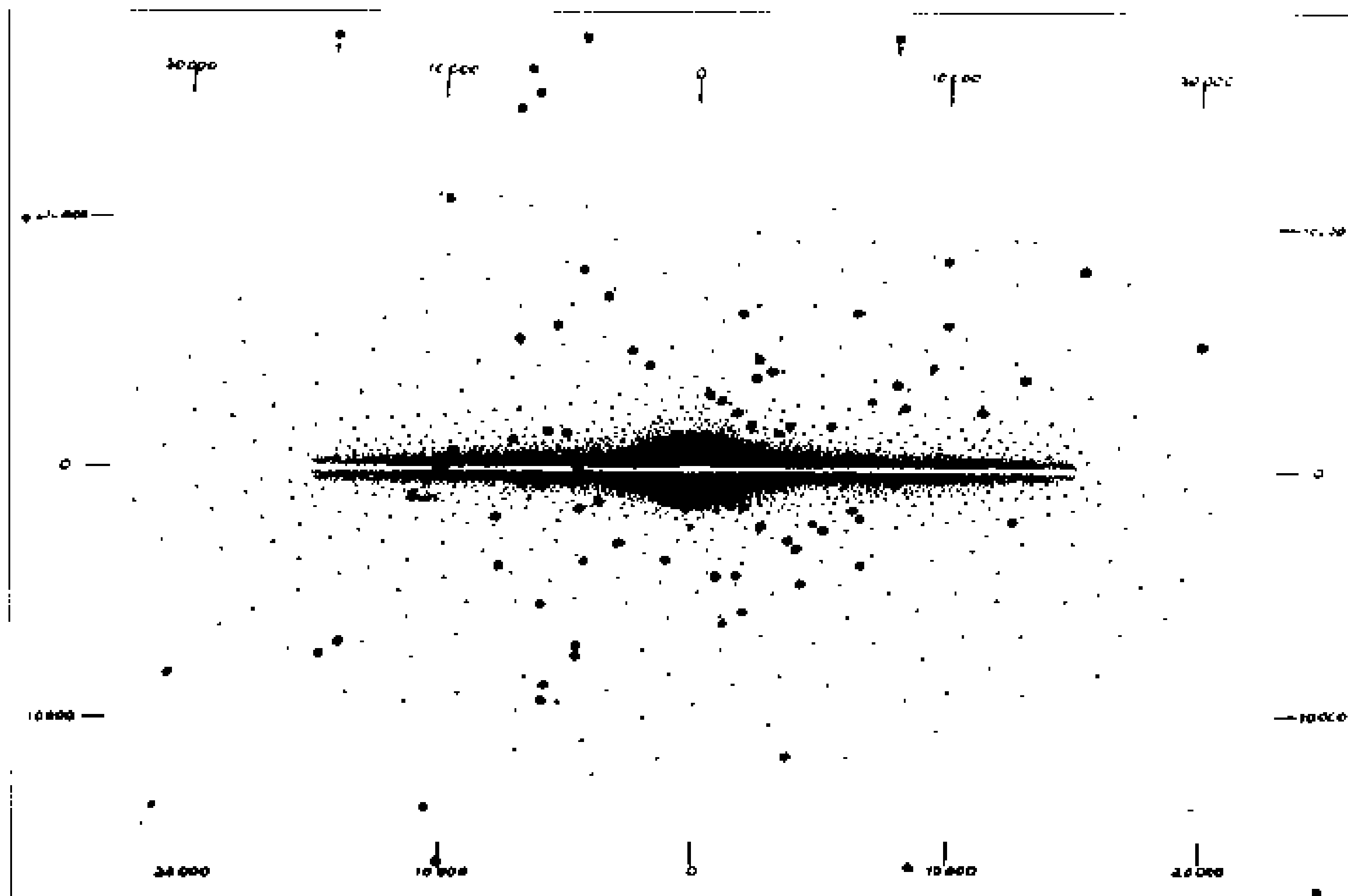
遍吸收量，即每5000光年星等减弱1等，这个值比现在公认的值小一点点。物质向银盘集中的程度是非常厉害的，以致肉眼和望远镜都看不见约30000光年以外的银核，这就解释了为什么早先人们不能看清楚银河系旋涡结构的原因。

银河系定型

在接下来的数年里，现代的银河系结构图像的要点终于被定了下来。1938年新近从不列颠哥伦比亚（British Columbia）自治领天体物理天文台（Dominion Astrophysical Observatory）退休的普拉斯基特（J.S.Plaskett，1865－1941年）对此做了总结。他说，银河系“有一个大的中央恒星盘，恒星不规则地成组或成团分布，可能有一些普遍而基本的场星并具有旋涡结构”。银河系直径大约在100000光年，中心厚度在16000光年左右。“一层弥散的消光物质向银道而高度集中”，厚度在1000光年左右，在银心四周球状星团和特殊光谱型的恒星聚集成圆球状。在经历了最近几十年的混乱后，普拉斯基特最终可以欣慰地给出这样一个结论：“这个新发展起来的银河系概念具有相当的统一性、完备性和可能性。”

旋涡星云

1845年罗斯勋爵的反射望远镜在看见“第一缕星光”的几个星期内就揭示了M51的旋涡形状，而在这个世纪的下半叶，已知的旋涡星云数目飞快增长。1898



J.S.普拉斯基特1938年的银河系结构演示图，这是从侧面看去。银河系的直径大约10万光年、中央核有1600光年厚。在银道面内是一层消光物质，而围绕银河系的是一圈球状星团和一些比较特殊的恒星。

年凯勒（James E.Keeler，1857－1900年）当上利克天文台的台长，开始用格罗斯利反射望远镜进行系统的星云照相观测。银河系中不规则形状的星云与那些结构更规则的星云之间的区别越来越明显了。而且，在旋涡星云较普遍的天区，也有一些类似形状的星云，尽管它们不显示出一种旋涡结构，但也有规则的形状，有圆形的或光滑的椭圆形外观，也像旋涡星云一样，越向中心越明亮。大家普遍把这类有规则形状的星云叫做"旋涡星云"，尽管看不出它们有旋涡结构。凯勒估计格罗斯利望远镜能够看到大约120000个旋涡星云，也许其中的半数能够显示真实的旋涡结构。

1900年的一致认同

这些神秘的天体是什么？许多人，包括凯勒，认为它们是正在形成中的行星系统。他写道："如果旋涡星云是通常假定的正在收缩的星云物质的形态，这个观点本身立刻预示着太阳系就是从一个旋涡星云演化而来的。"哈京斯在1889年的著述中也持类似的观点。对于一张仙女星云的照片，他说"它展示了一个处在演化高级阶段的行星系统，已经有几颗行星被甩出来，跟星云的大小相比，中央的气态物质已经浓缩到了一个合适的尺度，它一定是在所有行星形成之前就已经成形了"。

另一方面，旋涡星云有没有可能是星系，是巨大的恒星系统，只是由于巨大的距离，它们的真相向地球观测者隐藏起来了？难以相信存在上万个这样的"岛宇宙"。而确实也有一些显著的反证，一些是熟悉的类似，另一些是新的。

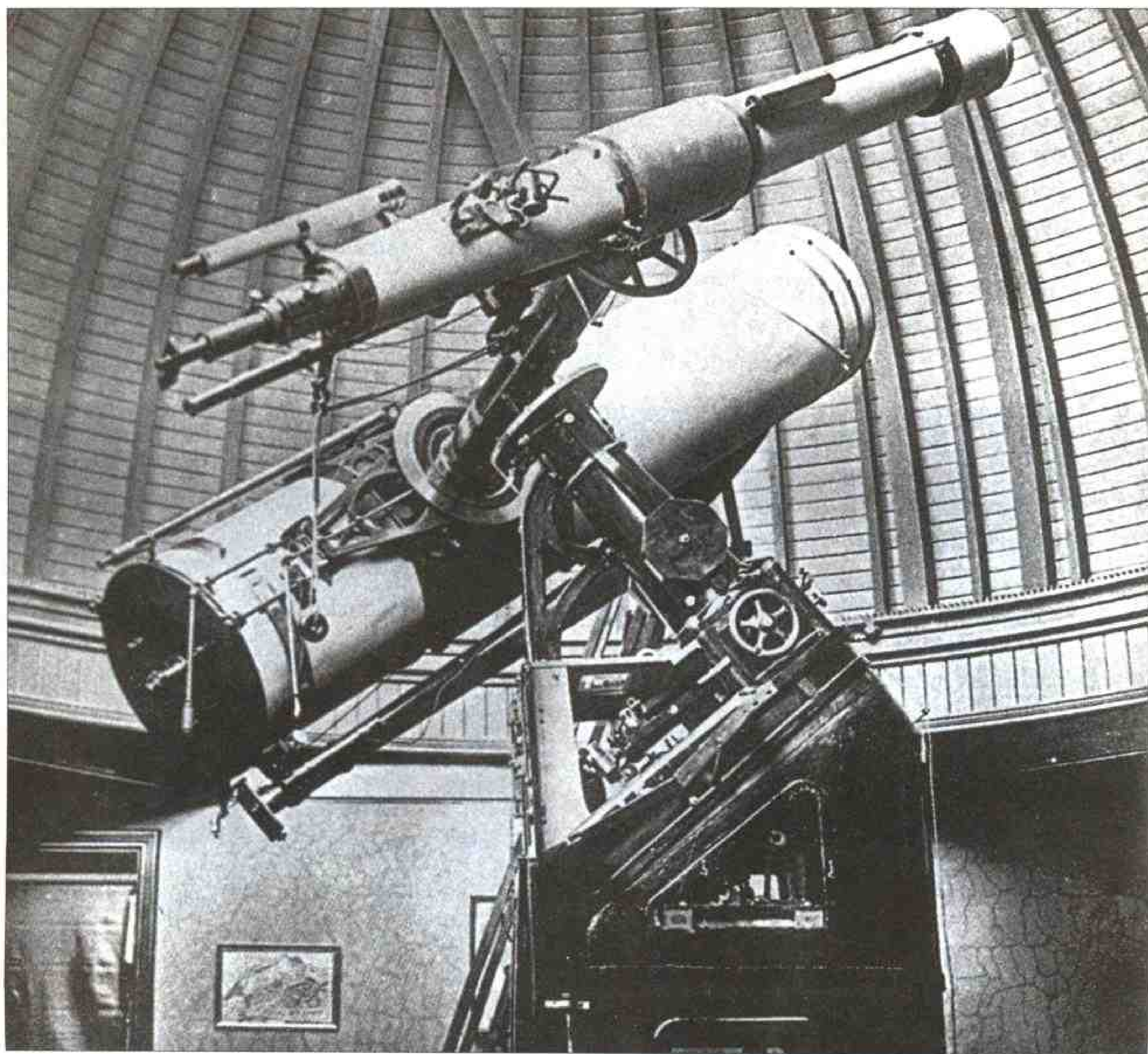
关于星云本质的长期争论证明了一些观点，即认为一些特殊星云中的变化发生得是如此之快，以致很难把它们当做是遥远的巨大的恒星系统。也许人们会认为，一旦照相术取代了在困难条件下工作的艺术能力有限的观测者的素描图，这

些变化的真相或者其他什么会是一个容易处理的问题。这个与真实情况相去甚远。早在1899年，一流的英国星云照相实践者罗伯茨（Isaac Roberts，1829—1904年）宣称，他有了仙女星云和涡状星云M51自转的照相证据——我们现在知道自转是一种幻觉。

还有两条额外的重要证据反对把旋涡星云证认为星系。一条是普罗克特的发现（见本书第301—302页），在靠近银河的天区中包含很少的旋涡星云。如果旋涡星云是和我们的银河系可比拟的星系，为什么它们在空间的分布要避开我们的银道面？

然后，出于一种不寻常的偶然性，1885年在仙女星云中一颗恒星骤然闪耀。

艾萨克·罗伯茨的天文台。他要编制一幅照相星图的原始计划被《照相天图》计划所取代，因此罗伯茨专心于星云的照相。这架仪器完成于1885年，较大的是用于照相工作的20英寸反射望远镜。而口径7英寸的折射望远镜则被用于目视观测。



它的亮度增加到等于整个星云亮度的十分之一。如果星云确实是包含了上百万颗恒星的星系，那么这单颗恒星的亮度在数天之内增加到了成千上万颗普通恒星加起来的亮度。事实上，这确实就是所发生的事实，因为仙女座S星（这是它的命名）是一颗超新星。但是对19世纪的物理学而言，无从得知哪一种方法能产生这样剧烈的天体焰火。看上去它更有可能的是，一颗恒星进入了适度大小的星云，而当它穿过星云时闪耀了一下。

1890年受人高度尊敬的天文学史家克拉克（Agnes C. Clerke）在他的名为《恒星的系统》一书中总结了天文学家的多数意见，他意味深长地在书名中用了“系统”的单数形式：

星云是否河外的星系这个问题几乎无需讨论了。它已经由不断进步的发现回答了。现在，可以可靠地说，没有一位有能力的思考者，在所有的可能证据面前，会把任何一个星云看做是与银河系同一层次的恒星系统。这个范围里的所有东西，恒星和星云，都属于一个奇妙的集合体，对此人们已经获得了一种实际的确定性。

所有的科学家都认为，用尽可能简单的理论来解释事实，是他们工作的职责，天文学家们也不例外。“星云”这个名词起源于对天空中一种天体的描述。（我们现在知道）一些星云是气态的，所以是“真正的”星云，而另外一些是隐藏在遥远距离之外的恒星系统，但是几个世纪以来，天文学家们一直努力把它们归类到这一种或那一种中去。因此，在1864年，当哈京斯的分光镜显示气态星云毫无疑问的存在时，在那些一直相信有数目众多的岛宇宙的人的头脑里播下了疑问的种





照相术用于星云研究带来的惊人进展的证据：1874年哈佛大学天文台绘制的仙女星云M31（左），和1888年艾萨克·罗伯茨拍摄的M31（右）。虽然哈佛天文台的绘图不能说明多少问题，罗伯茨的照片则展示了清晰的结构细节；尤其可以看出，该星云的平面与观测者视线倾斜成一定的角度。十年之后，罗伯茨说他有证据证明星云在自转。

子。现在这些疑问的种子长成了一种广泛的共识，就是只有一个岛宇宙。

1900 — 1920 年：一致认同带来疑问

钟摆摆得太远了。不久以后，新的证据表明，旋涡星云岛宇宙理论的死亡被大大地夸张了。虽然旋涡星云太暗弱，它们发出的很少的一点星光通过分光镜时被发散到几乎看不见的地步，但是到1912年仪器和照相术的改进，使得洛韦尔天文台的斯立弗（V. M. Slipher）能够获得一些星云的光谱，它们亮到足够能显示出更多显著的光谱线。这项工作确实非常艰苦，每一张底片需要20到40个小时的观测时间，但结果非常好，当他在1914年美国天文学会的会议上宣布他的结果时，获得了全体起立的欢呼。

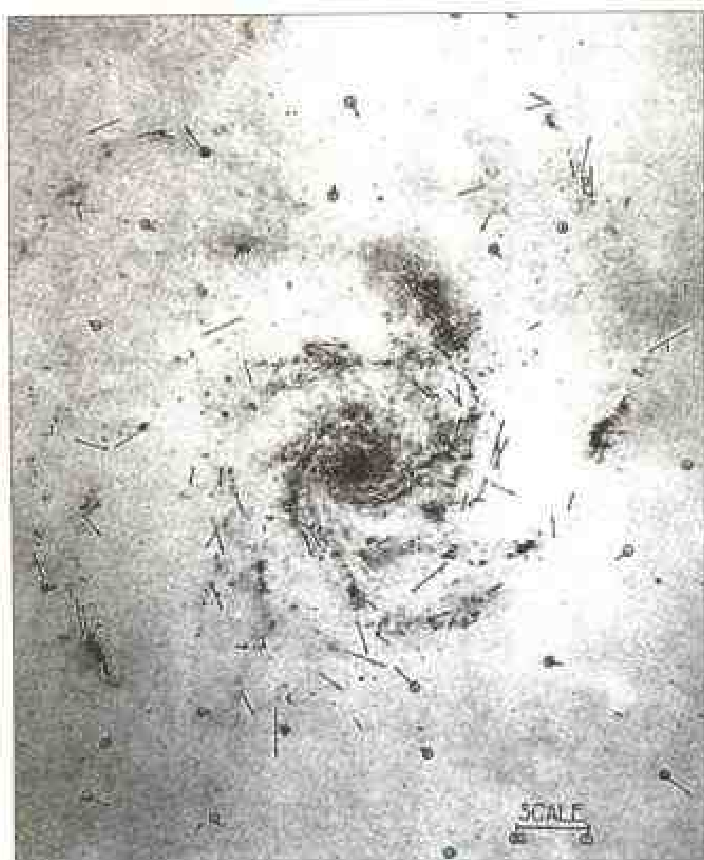
并不奇怪，仙女星云是斯立弗处理的第一个星云。带着几条暗线的连续光谱是恒星光的典型特征，到1913年1月他已经获得了四张底片，上面由多普勒效应（见279－280页）引起的谱线频移能够被测量出来。人们已知恒星的视向速度大约是每秒20公里，斯立弗发现仙女星云的视向速度接近不小于每秒300公里，远远超出宇宙中任何一个已知天体的最大速度。一些天文学家带着怀疑对他的这一发现表示了致意，但不久他的结果得到其他观测者的确认。到1914年会议期间，斯立弗有了15个旋涡星云的视向速度，到1917年总数目达到25个。这中间不少于4个的视向速度超过每秒1000公里。

斯立弗的25个旋涡星云不是均匀地分布在天空中。大多数位于银河系的一侧，并且在退行。但有些，包括仙女星云，在另一侧，并且它们的运动大多朝向我们。对斯立弗而言，解释很明显：银河系本身就是"一个我们身处其中的巨大旋涡星云"，它以每秒700公里的速度在其他旋涡星云中漂移。

与此同时，利克天文台的柯蒂斯在继续着开始于凯勒的星云照相观测项目，（如我们已经看到的，见第303页）他正遇到那些清晰地以侧面对着我们的星云。这些星云至少有一条外围的遮光物质带，柯蒂斯意识到在我们银河系存在的类似的遮光物质会阻挡我们看到接近银道面的旋涡星云。他得出结论说，旋涡星云并不像普罗克特和其他人所认为的那样要避开银河。跟任何其他方向一样，旋涡星云在银河方向也存在着，但是从我们的视觉中消失了。这坚定了他的信念，旋涡星云是"不可思议遥远的恒星组成的星系或者说是独立的恒星宇宙，它们是如此遥远，以致整个星系变成了一团不可分解的光雾。"

1917年当他在他的旋涡星云照片中发现三颗新星时，他的信念得到了进一步增强。大约同时，威尔逊山天文台的里奇（G.W.Ritchey，1864－1945年）在数天前拍摄的旋涡星云照片中发现了一颗新星，这颗新星仍旧可见，所以能为全世界的天文学家所研究。受这些成功的鼓舞，其他一些人加入了搜寻，因而更多的新星被发现。无一例外，这些新星全都比仙女座S星暗，这一点让柯蒂斯想到，新星可能分成两种不同的类别（稍后证明了这一情况，见本书第290页）。突然，从格外明亮的仙女座S星推得的结论变得似乎不可靠了。

但不是所有的新证据都有利于旋涡星云的岛宇宙理论。在威尔逊山的一位荷兰天文学家范马宁（Adriaan van Maanen，1884－1946年）作为一位照相底片



旋涡星云M101在自转的证据。1916年阿德里安·范马宁用“闪视镜”比较了几幅拍摄于不同时间的星云照片。这台机器能使他瞬时地从一张照片切换到另一张照片，因此两张照片之间的差异就能立刻被显现出来。范马宁得出结论说，这个星云在自转，方向如图中箭头所示。在短时间内有可察觉的自转，星云必定得小而且近。

小心翼翼的测量者为自己赢得了声誉。1916年，为了研究旋涡星云M101中的可能变化，范马宁通过使用一种叫闪视镜的机器，使得他能够在拍摄于不同时间的星云照片之间进行切换。这可以相对容易地觉察出在拍摄两张底片这段时间间隔内星云所发生的变化。他据此得出结论说星云在自转。如果是这样，星云几乎不可能是有巨大直径的遥远星系。因为如果旋涡星云自转，假想中的星系外围部分不得不将以难以置信的高速度在空间运动。

要把天文学的任何调查研究等同于简单的事实是困难的。照片描述了客观证据，范马宁有效地把他们叠加在一起，指出了其中的变化，描述了引起这些变化的自转。到1921年，他对另外三个旋涡星云也得出了类似的结论。“恭喜这些星云的结论！”沙普利写道：“在我们两个之间，由你把旋涡星云带进来，而由我把银河系往外推，我们似乎在岛宇宙中放了一台卷缩机（a crimp）。我们真聪明，我们确实聪明。”

另一项进展是关于旋涡星云视向速度的。随着已知速度星云数目的增加，慢慢显出斯立弗把这一现象解释成银河系在旋涡星云中的漂移是不成熟的。正在靠近的旋涡星系被证明是例外的，对极大多数旋涡星云而言，它们在向各个方向退行。沙普利甚至提出，它们有可能是被银河系所有恒星光联合起来产生的辐射压驱赶出去的小片物质。这样，有利于旋涡星云“岛宇宙”理论的运动失去了它刚刚获得的一点动力。

从1917年起，威尔逊山天文台的100英寸胡克反射望远镜开始被投入使用。它拥有世界上所有望远镜中最大的反射镜，具有极佳的光学成像质量，所以这100英寸反射镜对像星云这样的暗弱天体进行照相观测具有独特的威力。1920年，马萨诸塞州威斯利大学一个小天文台的台长敦坎（J.C.Duncan，1882 – 1967年）在一些照片中，包括一张是用100英寸反射镜拍摄的，注意到旋涡星云M33中3颗微弱的变星。这些是令人鼓舞的迹象，或许可以通过使用100英寸反射镜进行决定性的观测来获得它们。

哈勃发现仙女星云造父变星（1923 – 1924年）

1919年哈勃（Edwin Hubble，1889 – 1953年）从军队退役，这使得这位从律师转行的天文学家能够答应早先请他加入威尔逊山天文台的邀请。1923年10月，他着手系统地搜索仙女星云中的新星，该星云是所有旋涡星云中最大的一个星云，也许还是最有可能找到新星的一个星云。哈勃在第一张底片上就找到了一颗新星。

这至少是他最初的判断。但是当他沿着他的思路处理威尔逊山天文台关于这个星云的照片档案时，其中大多数照片是用60英寸望远镜拍摄的，并追溯到1909年，他意识到这颗星不是一颗新星而是一颗变星。当搜索完成时，他发现超过60片的底片上有这颗星，有时暗于19等，其他时间亮到18等。照相底片的数目足够让哈勃绘出这颗星的光变亮和减弱的模式。

看起来这颗变星似乎最大的可能是一颗造父变星，是沙普利用来确定球状星团距离的“灯塔”星之一。如果是这样，它的光度应该从最小迅速跳到最大。为了检验这个预测，哈勃在1924年2月的第一个星期里拍摄了一系列底片。恒星的



建造中的威尔逊山100英寸反射望远镜。在图中的情形下，望远镜将会指向天顶（而工人会站在镜面上）。这种赤道式装置使得望远镜无法观测北极附近的天区，但是为了望远镜的稳定性，这是值得付出的代价。

"大辩论"

1920年在华盛顿召开了一次会议，会上哈罗·沙普利和赫伯·柯蒂斯为他们各自关于宇宙结构的观点展开了辩论。但事实上他们的注意力集中在不同的地方。沙普利被他的大银河系缚住了手脚，旋涡星云对他而言是不重要的，它们几乎不可能是直径30万光年的星系。柯蒂斯正在研究旋涡星云，他认为它们是岛宇宙，虽然他提出的银河系大小除了沙普利外几乎每个人都能接受，但对他而言银河系的结构是次要的。

虽然这次会议后来被神传为"大辩论"，但这是由于在华盛顿实际发生的和许多个月后所公开的两个辩论版本之间的错乱所造成的。在会上，沙普利对哈佛大学天文台代表的在场感到明显不安，他正觊觎那里空缺的台长职位，因此他确信他不在意失败，他读了一篇初等得近乎琐碎的文章。第二个发言的柯蒂斯想抛开他的技术资料，但决定得太晚而不能改变了。然而在发表出来的"辩论"版本中，两位各自给出了一个关于这场辩论的观点强硬的简述以维护自己的观点。天文学家们发现，很难判断谁的观点更有力。

光度正如预言那样迅速增大，它确实是一颗造父变星。

当他确认了这颗变星的光变曲线的特征形状和它的三十一天多的光变周期后，哈勃一定难以抑制他的激动。造父变星的光变周期越长，它的光度就越大。而这颗星最亮时看起来只有18等，它如此暗弱，以致逃过了威尔逊山天文台早期研究人员的注意。因为它是这样亮，而看起来又是这样暗，它的距离——即星云的距离，这颗恒星是星云的一部分——事实上接近一百万光年。即使按照沙普利对银河系大小的估计，这个星云也远远位于银河系之外。

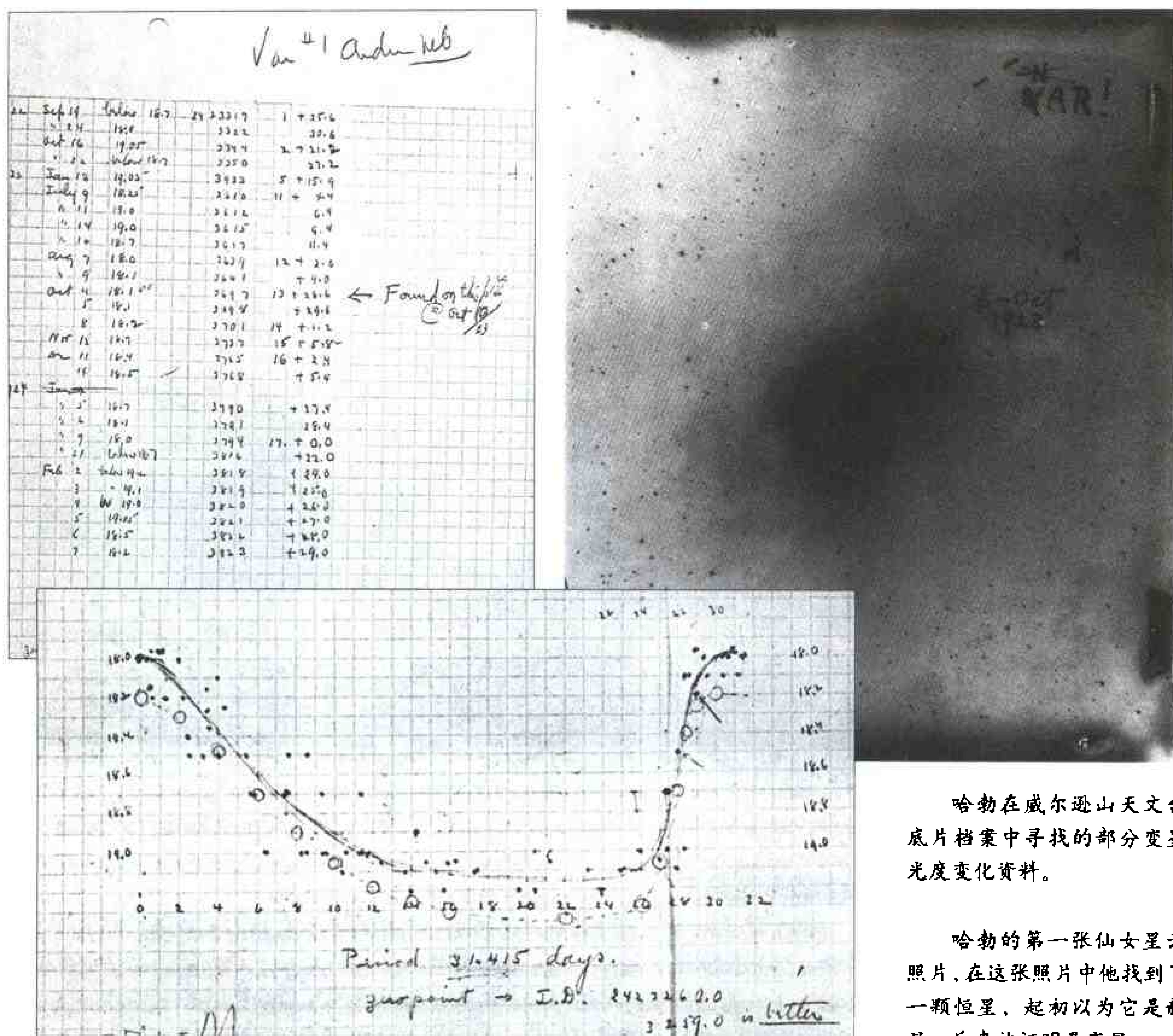
此外，这颗造父变星证明了这个星云里不仅包含了尚难解释的类恒星天体，还包含了一颗以熟悉的方式变化的真正的恒星。而且不只是有这么一颗恒星，到哈勃足够自信而在2月19日以一封写给沙普利的信打破沉默时，他已经发现了第

埃德温·P. 哈勃

埃德温·鲍威尔·哈勃（Edwin Powell Hubble）1889年11月20日出生于密苏里的马希菲尔德（Marshfield）。起先他在牛津大学学习法律，但不久就转向天文学，并成了芝加哥大学叶凯士天文台的一名研究生。战争使他未能及时就任威尔逊山提供给他的职位，但在1919年他加入了该天文台。可以说，他用威尔逊山60英寸和100英寸反射镜和后来用帕洛玛山200英寸反射镜做出的发现改变了人们对宇宙面貌的认识。但是他的自负和差劲的判断力使他与台长的位置失之交臂。1953年9月28日，他在加利福尼亚圣马利诺因心脏病去世。



埃德温·哈勃在帕洛玛山天文台操纵48英寸的施米特望远镜。对于一种短焦距大视场的反射望远镜，如果它的一块镜子是球形的，另一块如果是抛物面的，它的成像会产生某种形式的畸变。但在1930年左右，爱沙尼亚人伯纳德·施米特发明了一种改正板克服了以前的问题。带着这种装置的“施米特”望远镜，可以在一张底片上拍摄大范围的天区。它们主要被用于照相巡天中，尤其是在20世纪50年代的《帕洛玛天图》和更近的《南天天图》的编制中，这两种天图都包含了全天暗到21等的恒星。



哈勃在威尔逊山天文台底片档案中寻找的部分变星光度变化资料。

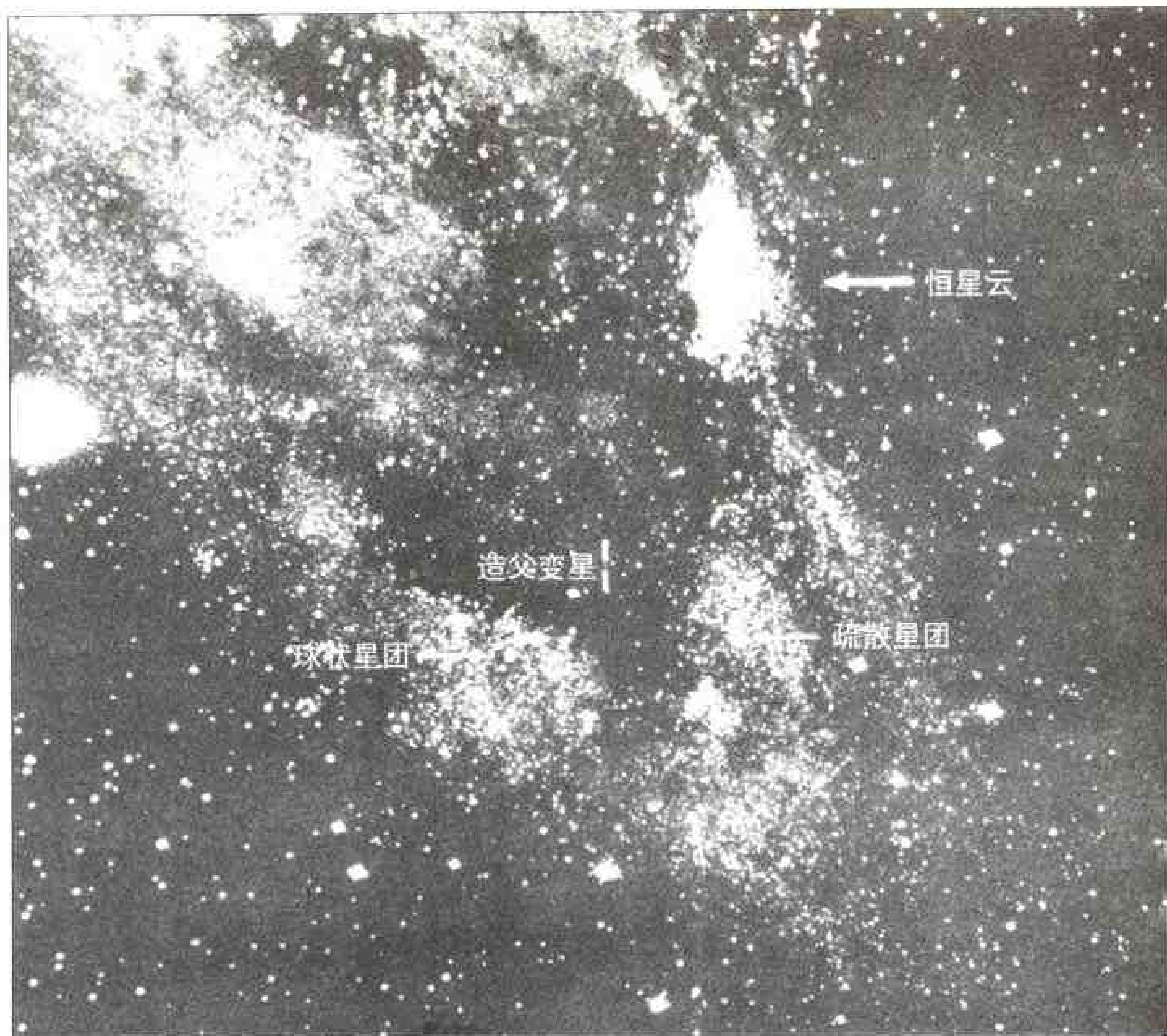
哈勃的第一张仙女星云照片，在这张照片中他找到了一颗恒星，起初以为它是新星，后来被证明是变星。

寻找的结果：光度的起伏是周期性的，光变曲线是典型的造父变星光变曲线的形状，显示出快速的升高和缓慢的下降（见297页），它的周期是31.415天。

二颗变星和9颗新星。

这是天文学史上重大的一页。哈勃与沙普利使用了同样的尺子，但以更令人信服和直接的方式使用它。沙普利，对他而言大银河系原本是第一位的，旋涡星云的地位是第二位的，也立即承认了哈勃的发现所预示的结论。

范马宁不承认，他是哈勃的同事但不是朋友——他们两人只通过媒介进行交流。困扰于他的结果与范马宁所谓的旋涡星系自转的不相容，哈勃犹豫于把结果发表。最后，并且也只是在沙普利和其他人的坚持下，哈勃答应在他缺席的情况下，在1925年元旦美国天文学会的会议上宣读一篇概述他的发现的文章。那些出席会议的天文学家明白，长久的争论已经结束：确实有许多“岛宇宙”。



威尔逊山天文台100英寸反射望远镜威力的展示：一幅1925年仙女星云的照片，哈勃将此用作他1936年的经典著作《星云的王国》卷首插图。“观测者的视线透过围绕他的群星，穿过边界，飞越虚空，发现另一个恒星系统……星云中最亮的恒星粒粒可辨，观测者在其中辨认出在他自己星系里熟知的恒星类型。这些熟悉的天体位于星云中，看上去这么暗，意味着星云的遥远——如此遥远，以至于光要旅行70万年。

哈勃挫败范马宁

两个严重的异常始终存在：范马宁自转和沙普利对我们星系直径的估计，它意味着如果仙女星云是一个岛，那么相比之下银河系是一个大陆。范马宁难题变得棘手了，那位荷兰人用他对一些旋涡星云照片的比较来针锋相对地维护自己的结论，对每一种情形都得出结论：如果星云是岛宇宙，则它正以一种物理上不可能成立的速度自转着。

哈勃的恼火变成了愤怒，他最后决定采取一项机灵的策略。在1932年和1933年他重复了范马宁的步骤，比较了同一批照相底片（尽管在技术上有明显的不同）。另外，他还有专门为此目的拍摄的新底片。他还获得两位有经验的同事的帮助，他们各自独立地进行了测量。

他们三个一致认为，在被讨论的星云中，“范马宁预言的内在运动状态不存在”。不能说哈勃和他的同事们在他们的测量中都产生了误差，而这个误差以最为奇妙的方式总是消去“自转”，为他们留下零结果。显然，自转是一种幻觉。

哈勃起草了用于发表的论文，具体描述了他对范马宁的挫败。但是威尔逊天文台的台长不允许他的研究人员的内部不和被公开展示出来。一种折衷方案被采用，1935年《天体物理学报》的读者们无疑会饶有趣味地发现，有一篇哈勃写的两页论文，微妙地概述了他的结论，紧跟着是范马宁的两页论文，退步到“有条

件地看到那些运动（旋涡星云的自转）是值得期望的。”

银河系和仙女星系：最后的相似性

哈勃的发现产生的第二个异常，从沙普利对银河系大小的估计中派生出来。根据沙普利，银河系直径大约有300000光年。哈勃的仙女星系距离推出它的直径只有银河系直径的十分之一，而体积仅有其千分之一。这个矛盾由于1930年特伦普勒发现的遮光而减弱了，这种遮光消弱远处银道面上天体的光线，误导了沙普利认为银河系造父变星比它们的真实距离更远。这把银河系的直径减小到100000光年。同时，增加了敏感度的照相底片显示仙女星系的直径比以前认为的伸展得更远。即使这样，银河系仍旧是一个超级系统，而相比之下仙女星系很小。

许多天文学家的本能使得他们对任何使我们在宇宙中处于优势地位的理论感到不舒服。仙女星系在许多方面都类似银河系，这使得两者的大小差异更加令人迷惑。它们都包含数量众多的亮造父变星、球状星团系统和（很可能）由一层尘埃和高亮度蓝星勾划出的旋臂。而仙女星系中的新星被认为是暗于银河系中的同类，最亮的恒星和最亮的球状星团也是如此。

球状星团尤其令人费解，因为在这个问题上星际消光物质的存在造成的消光效应带来的不确定性不产生影响，消光平等地影响球状星团和星团内恒星距离的测定，星团恒星的相对亮度不受影响。然而在现行的图像中，仙女星系中的球状星团比银河系中的球状星团暗四等。

一些天文学家反复指出，如果仙女星系被赋予一个比新近公认的距离大一倍的距离，那么那些不一致就消失了。瑞典伦德（Lund）的伦德马克（Knut Lundmark，1889－1958年）就是持此观点的一位天文学家。爱沙尼亚天文学家欧匹克（Ernst Opik，1893－1985年）也在1922年用一种有创造性的新方法确定仙女星系的距离。几年前，威尔逊山天文台的皮斯（F.G.Pease）用多普勒效应（见279页）来测量这个星云不同部分的自转速度。欧匹克指出，如果恒星的混合与我们星系的一样，质量对光度的平均比率也一样，那么皮斯的观测要得到解释的话，仙女星系必须在150万光年以外。这也比哈勃1925年900000光年的数值大得多，并会意味着仙女星系要比哈勃认为的大。但是在造父变星法确定距离的精度上投入了这么多，以致在天文学家们中间这篇论文几乎成了一种信念，哈勃的距离值取得了胜利。

一个进步的障碍是缺少有关仙女星系中央亮区域的信息。它的外围已经在照相底片上被分解成恒星，但中央浓缩部分还没有。用现存的仪器，这项工作似乎毫无指望。威尔逊山天文台的100英寸反射镜是世界上最大的，但即使如此，从理论上的考虑可知，分解中央核球部分的任务已将它置于能力的极限处了。无论如何，附近洛杉矶的城市灯光使得这一探索毫无指望。

但是正如它所拥有的幸运，当美国进入第二次世界大战后，作为安全措施，这些灯光暗下来了。虽然大多数天文学家离开天文台去为战争服务了，但留下来的一个是德国人巴德（Walter Baade，见289页），他有生理残疾（并且不管怎么回事，他漏掉了取得美国公民的仪式，所以他被免除了兵役）。

巴德在用100英寸反射镜进行长时间曝光方面具有异乎寻常的技巧，1942年

315页：帕萨迪纳威尔逊山天文台总部光学车间内的200英寸耐热玻璃主镜。建造这样大一块主镜带来很多问题，解决这些问题要花费大量的时间和金钱。经过数次尝试，一块完美的主镜终于在1934年铸造成形，但退火和冷却又花了另外一年时间，而抛光直到二次大战以后还没有完成。但是最后的成功为全世界建造大型反射镜开辟了成功之路。注意有棱纹的构造，用它来保持重量在20吨之下，并限制仪器使用中温度变化带来的问题。

秋天他的第一次努力把他带到了成功的边缘。不幸的是，尽管城市相对暗了，但他的快速蓝光敏感底片还是记录下了夜空暗淡的背景光，这把有效的曝光时间限制到了90分钟左右。因此巴德改用了新引进的红光敏感底片。这些底片对背景光较不敏感，他进一步用滤色器减少背景光。这些底片对红星更加敏感，哈勃分解的星云的旋臂中有非常亮的蓝星，但他没有能够分解中央的核球，这一事实表明或许在中央核球处红星占多数。

1943年秋天，巴德拍摄了仙女星系的中央核球部分，每张底片曝光约四个小时。他必须极度小心地控制望远镜，相当重要的原因是随着夜晚慢慢流逝，空气温度的变化常常威胁到仪器使其不能聚焦。他得到的报答是照片上显现出成千上万的恒星，对两个较小的椭圆伴星云的拍摄也得到了同样的结果。

大量的恒星事实上是红星，但它们比特伦普勒在我们的银河系的疏散星团中发现的红星要亮，所以它们在赫罗图上占据不同的位置。最后，在巴德看来，仙女星系中的红星在赫罗图上的位置事实上与围绕我们星系的球状星团中的红星的位置相似。

这个比较能够外推吗？仙女星系的中央核球中也像我们的球状星团中那样富含短周期的天琴座RR型变星吗？不幸的是，没有办法来回答这些问题，因为用现存的仪器来探测，这些恒星全都太暗。

但是哈勃和巴德找到了另一条前进的道路。数年前沙普利已宣布发现了一种新型的星系，在御夫座和天炉座内有这样的星系样本。它们位于我们的银河系之外，但比椭圆星系小得多。然而它们比我们的球状星团大得多，它们的恒星组成类似球状星团的组成：大量红巨星和天琴RR型变星。天文学家们原来倾向于认为它们是生长得过大的球状星团，但是在巴德于仙女星系中央发现大量红巨星之后，事情终于弄明白了：御夫座和天炉座的星系是介于球状星团和椭圆星系之间的中间状态，在三者中间都可以找到类似的恒星组成。

1944年巴德发表了他关于恒星分属于两种星族的结论。星族Ⅰ恒星富集于银道面。它们包括像太阳以及他的邻近恒星和毕星团、昴星团等疏散星团中的恒星。它们由也占据着银道面的星际物质、气体、尘埃形成，它们的平均化学组成与太阳的相似。位于主星序上端最亮的蓝巨星是新近从星际物质形成的，所有的星族Ⅰ恒星、气体和尘埃都沿着近圆轨道绕银河系中心旋转。

星族Ⅱ恒星则是老年恒星，存在于没有气体和尘埃的椭圆星系，也存在于漩涡星系中同样不含尘埃的球状星团，还有漩涡星系的中央核球。在我们的银河系中，球状星团和孤立的星族Ⅱ恒星沿着椭圆轨道绕银心运动，这些轨道向银道面倾斜的角度各不相同。平均起来看，星族Ⅱ恒星不参与太阳和星族Ⅰ恒星在银道面上的快速圆周运动。当星族Ⅱ恒星运动到太阳邻近区域时，它们被测得的速度因而会变大。

这件事情的真实复杂性再次阻挠了天文学家套用一个简单的模式的设想。甚至巴德的两个星族的分类也将被证明是过于简单的。

巴德的另一个问题与天琴RR型变星有关。这类变星在球状星团中尤其多，所以常被叫做“星团变星”。它们与短周期造父变星很类似，起先就把两者混同了。但是由于造父变星的光度依赖于它在一个周期内的天数，而我们银河系内的天琴


P&H

RR 型变星的光度全都与它们周期的长度无关。

在他对球状星团距离（因此也就是银河系的直径）的估算中，沙普利有时由于缺少造父变星而不得不利用天琴RR变星来代替，尽管周期为半天的天琴RR变星比周期为10天的造父变星暗大概两个星等。在用100英寸反射镜拍摄的仙女星系的照片中，这些造父变星的视星等大约在20等，这种情形下天琴RR型变星的亮度可能在22等——这超出了100英寸反射镜所能达到的范围，但在正建造于帕洛玛山的200英寸反射镜能力所及之内。帕洛玛山在洛杉矶南部，远离了城市，避开了恶劣的城市灯光污染。

1948年200英寸反射镜一投入使用，巴德就开始用它。他希望这台望远镜能够揭示仙女星系中的天琴RR型变星，但是，正如他在1952年罗马的国际天文联合会上所说的，用200英寸反射镜拍摄的第一张仙女星系底片"立刻就显示什么事情错了"。原因要到巴德的两种星族中去寻找。沙普利用来校正周光关系零点的近距离造父变星位于银河系的旋臂中，亦即属于星族Ⅰ，这些恒星现在被证明是比以前认为的要更亮——所以也更远。对于哈勃在仙女星系旋臂中搜寻到的远造父变星也是如此，它们同样要被移到更远的位置上。但是沙普利用来确定球状星团距离亦即银河系直径的造父变星属于星族Ⅱ，它们的亮度被准确地估测了。结果就是银河系的直径维持原状，而仙女星系的距离要加倍，所以它的直径也要加倍。如巴德所述：

此外，误差还必定存在于如下情形，我们先前对河外星系距离——而不是我们自己的银河系内的距离——的估算小了一半。从修正过的距离立刻可以推出许多值得注意的结论：M31［仙女星系］中的球状星团和我们银河系中的球状星团被证明了具有非常接近的亮度，而我们的银河系现在被证明可能比M31稍小一点。

这样我们的银河系失去了沙普利曾经赋予她的优势，而被给予了如今的地位，某种程度上她是仙女星系的一个小妹妹。

宇宙膨胀和相对论

在1952年罗马会议的演讲中，巴德加了一个进一步的评注："最重要的是，哈勃的宇宙特征时间尺度现在必须从大约1.8×10^9年增加到3.6×10^9年"。哈勃如何能赋予宇宙一个年龄？

为了回答这个问题，我们不得不回到19世纪去。在天文学上，牛顿平方反比的万有引力定律，结合快速增加的数学手段，应用到日趋复杂的天体力学问题中去，取得了巨大的成功。牛顿的定律适用于一个简单熟悉的宇宙：在使用欧几里德几何的三维空间框架中，时间——过去、现在、未来——均匀流逝，理论上、如果不是实际上的话，可以在任何一处用钟测得均匀完美的时间。但是一个恼人的观测事实有待解释：即1859年勒威耶发现的水星近日点异常进动（见183页），顽固地拒绝向牛顿的理论屈服。

在19世纪中期的物理实验室里，产生了大量有关电、磁、物质之间关系的复杂知识，19世纪60年代麦克斯韦用一个统一的理论主要地解释了电、磁、物质之间的关系，麦克斯韦理论被赋予了与牛顿引力理论同等重要的地位。麦克斯韦方程组的一些特征使得一些像荷兰人洛仑兹（H.A.Lorentz，1853–1928）这样的理论物理学家深入思考空间和时间概念以及它们的关系。而像高斯和他的学生黎曼（G.F.B.Riemann，1826–1866年）已经探索了弯曲空间中的几何学在逻辑上是自洽的，尽管他们放弃了欧几里德的一条公设。

1880年，出生于波兰的美国物理学家迈克尔逊（Albert A.Michelson，1852–1931年）在波茨坦天体物理天文台工作，那里有一个防震工作室。这个幸运的条件使得他能够执行一项由麦克斯韦理论提出的精确光学测量。令人迷惑的结果是，简单来说，光的电磁理论需要一种以太，但不能测得地球在以太中穿行的效应。

这些和另外一些研究表明，曾经似乎是坚固无比的物理学和力学大厦的根基出现了裂缝，那些曾经似乎不可挑战的理论现在疑问重重了。对建立一套新时空观念的最大贡献，由德国出生的爱因斯坦（Albert Einstein，1879–1955年）在20世纪头二十年做出。正如牛顿说他自己，爱因斯坦也同样是站在巨人们的肩膀上的，因为是在洛仑兹和其他许多人的工作基础上，爱因斯坦以新的疑问精神发展了他自己的观念。

爱因斯坦第一项重要贡献做出于1905年，提出像长度和时间这样的量的测量，不是在牛顿的绝对框架里进行，而是相对于观测者的。这个狭义相对论理论解释了像迈克尔逊实验这样令人迷惑的结果。

1915的广义相对论走得更远。这本质上是一个引力理论——不是牛顿理论的修正，而是关于物质、空间和时间之间关系的全新的思考方法。广义相对论的方程可以用来计算行星的运动（正如牛顿的理论所做的），并且几乎立刻就给出了水星近日点进动的一个新的理论值，这个值现在与观测值符合得很好。广义相对论还预言了，当光线经过像太阳这样的大质量物体附近时，会发生偏折，其偏折的量比牛顿理论预言的要大得多。1919年发生了特别有利于观测的日全食，在爱丁顿领导下的格林威治天文台的两个远征队完成了对这项预言的检验，新的预言值被证实。

星云谱线的红移

这里我们关心的是，相对论方程组也能对宇宙在大尺度上如何运转的问题给出各种各样的解答（依赖于对宇宙物质总量的假定和时空的几何学）。有些解答预言宇宙不是静止的而是在膨胀。

这个问题把我们带回1912年以来斯立弗发现的旋涡行星巨大的视向速度（见本书第307页）。可以肯定，起先爱因斯坦并不知道斯立弗的工作。同样地，爱因斯坦广义相对论艰涩的概念和高等的数学也超出了大部分实测天文学家的理解能力。但是从20世纪20年代中期开始，尤其是伴随着莱顿大学的德西特（Willem de Sitter，1872–1934年）和圣匹茨堡的弗里德曼（A.A. Friedmann，1888–1925年）的理论工作，越来越清楚地显示出，宇宙学不再是一门推测性的学问，而是



弥尔顿·休马森

弥尔顿·拉塞尔·休马森(Milton Lasalle Humason) 1891年8月19日出生于明尼苏达州道奇散特 (Dodge Centre)。年青时他在威尔逊山天文台干过一段骡车夫，1917年成了那里的望远镜的夜间维护员。一名学生教他天文照相的技术，休马森在这项工作上显示出天才，因此在1922年被任命为助理天文学家，不久他便成为暗星云光谱照相方面的权威，这位前骡车夫被证明是埃德温·哈勃的价值无法估量的助手和拍档。休马森1957年退休，1972年6月18日去世。

一门既有理论方面也有实测方面的科学新分支。

到1925年，已经得到总共45个星系的视向速度，它们中的大部分由斯立弗测定。而其中的少部分在其他天文台得到检验，斯立弗测量的可靠性得到了公认。最大的视向速度超过了每秒1000公里，意味着这些星系是银河系引力控制之外的独立物体，与哈勃新近展示的岛宇宙理论相容。

难以解释测得的这些变化范围很大的速度值。尤其很难分离出观测到的运动中与太阳和银河系的复合运动有关而与所研究的星系无关的运动。1918年德国凯尔（Kiel）的维尔兹（Carl Wirtz, 1876 – 1939年）尝试了一种后来被证明是有用的研究恒星运动的方法，他在方程中引入了一个附加项，叫做K项。在搜寻太阳系的运动之前，从所有测得的速度中减去这样一个有效量。结果表明，星系的K项远远大于恒星的，达到每秒数百公里。K项意味着星系系统的显著膨胀并飞向各个方向，这点当然没有逃过维尔兹的注意。

1924年，维尔兹使用了42个星系的视向速度，试图发现K项是否依赖于星系的距离。这些星系的距离当然不知道，但是假定星系属于一个相似物体的单一类别，那么星系视直径越小，它们的距离就越远。星系的距离和离开观测着的速度之间的一个粗略关系确实出现了，可以这样说，星系的距离越远，它退行的速度越快。现在可以清楚地明白这个蕴含的宇宙学意义了：维尔兹论文的标题（从1924年德文《天文通报》译出）是《德西特的宇宙学和旋涡星系的运动》。

哈勃和红移定律

哈勃很了解维尔兹的工作，并在他的著述中很率直地感谢他的工作。从1925年起，他为观测宇宙学问题——旋涡星系的退行速度和它们的距离的关系——在100英寸反射镜上投入了大量的观测时间（在他生命的最后数年，他用200英寸反射镜观测）。在那些年里，关于这些天体的想法的进展反映在对它们的叫法上："旋涡星云"变成了"河外星云"——就是我们银河系以外的星云——最后是现代叫

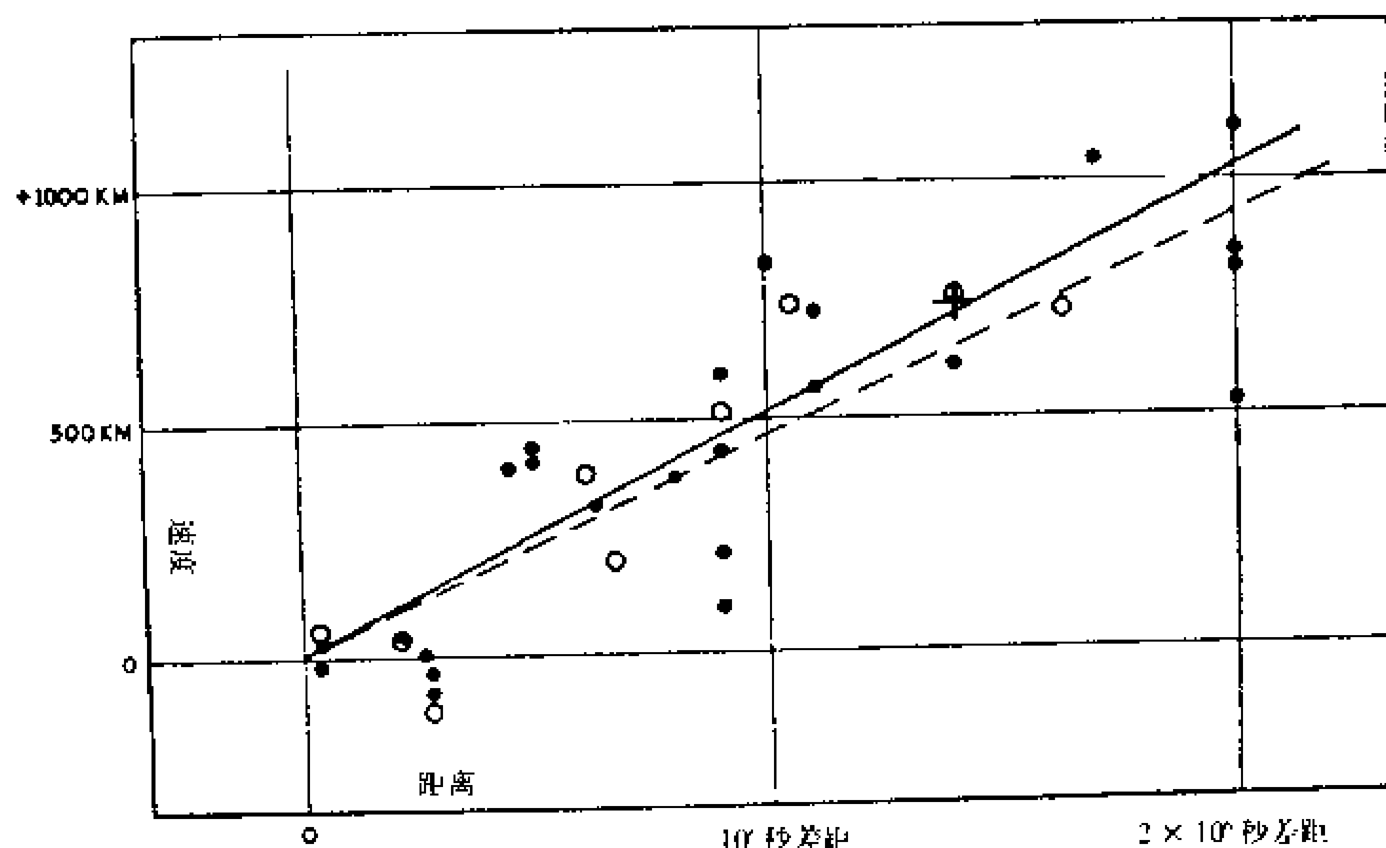
法“星系”。

哈勃跟他的同事休马森（Milton Humason）一起分担这项工作。休马森将他的观测技巧集中在更远（和更暗）星系视向速度的测定上，哈勃设计出根据照相底片上像的亮度来确定真实距离的方法，并进行实际的测量。但是即使是用100英寸反射镜，也只有最近那些星系中的造父变星才能被探测到。哈勃发明了一种“踏脚石”方法，此法为后来的天文学家们所沿用。在那些刚刚能够看见造父变星的星系里，他识别那些最亮的单个恒星，它们一般比造父变星亮50到100倍，然后在更远的星系中，用这些同一光谱型的亮恒星作为标准天体。这是单调乏味又缓慢的工作，正如哈勃所认识到的，工作中的微小误差很容易积累。

到1929年，他已获得24个星系的视向速度和独立的距离测定，他发表了一幅速度（上限到每秒1100公里）作为距离（上限到2000000秒差距，或略超过6000000光年）函数的图。虽然弥散很大，但是速度与距离之间有明显的关系，最好的直线显示每一百万秒差距（即1Mpc）退行速度增加每秒500公里。哈勃第一次估算给出的这个量即500公里／秒／百万秒差距，后被叫做哈勃常数，这是宇宙学的基本常数之一。而“星系退行速度正比于它的距离”被叫做哈勃定律，或者——因为距离通过向红端的多普勒频移测定——叫做红移定律。

这个定律能够适用到向宇宙深处多远？这必须通过很不同的方法来确定，因为即使星系中最亮的恒星也不能辨别，星系的红移也能被测到。哈勃发明了一种具有创造性的方法。就像银河系中有星团一样，在宇宙中也有易于辨别的星系团。休马森选取这样的星系团样本，它们的大小和视亮度说明它们在非常不同的距离上，然后测量每一个星系团中最亮星系的红移。哈勃认识到，一个星系团会包含一到两个亮得有点畸形的单个成员，但是他认为，如果不是测量每个星系团中最亮星系的视星等而是第50个亮星系的视星等，那么就可以避免那种畸形带来的冒险。沿着这些思路工作，哈勃和休马森表明，红移定律在巨大距离上仍有效。这就意味着，如果哈勃常数通过其他方法获得，就可以通过一个暗星系的红移来计算它的距离。

1935年哈勃应邀到耶鲁大学做一系列演讲，他把演讲以《星云的王国》为名出版了。该书清晰地概述了那个时代的观测宇宙学知识，并影响了整个新一代的天文学家。



哈勃的速度－距离关系，适用于距离远到2 × 106秒差距的星系。纵坐标是以公里／每秒表示的径向速度（对于太阳系自身运动做了改正），横坐标是用秒差距表示的距离。圆点和圆圈都表示观测数据，只是相对于用不同的方法计算出的太阳运动做了修正。两条不同的直线说明从数据得出的简单关系。

红移的解释

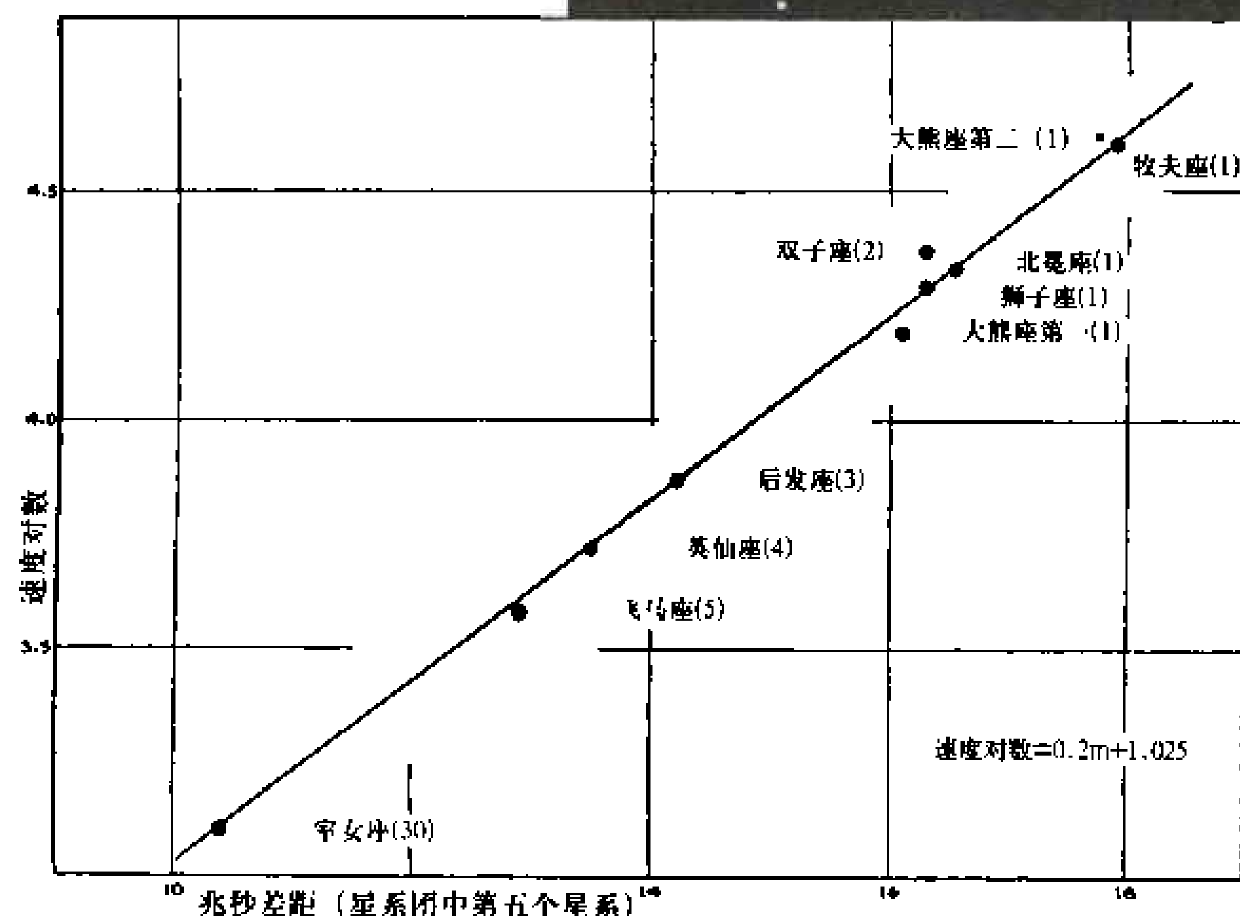
值得指出的是，最初红移被解释为多普勒频移——也就是与星系远离观测者的运动有关——并以每秒多少公里来度

量。从红移推断出来的是宇宙在膨胀。与红移探测几乎同时，爱因斯坦方程的解算得出了结果，方程的解表明宇宙会是膨胀的，这毫无疑问大大鼓励了把红移解释为膨胀的结果。

顺着膨胀解释的思路，当我们在时间上倒退，星系就相互靠近，在早先某个时候（我们可以简单地把它叫做“宇宙的开始”）宇宙曾经极度稠密。从那时到现

后发座的星系团，1933年用100英寸反射望远镜摄得。在相当于月亮视圆面大小的天区中有四百个左右的星系。

速度－距离关系延伸到遥远的星系团中。每个星系团的距离从该星系团中视亮度排位第5的星系推算出。



在这段时间可以叫做"宇宙的年龄"、在最简单的解释中，宇宙年龄与哈勃常数成反比——哈勃常数越大，宇宙越年轻。这在20世纪40年代已经产生了一些问题：哈勃的 1.8×10^9 年的宇宙年龄小于公认的地质学家所要求的地球年龄。

我们已经看到（见本书第316页）巴德对造父变星定标的修正，把哈勃常数缩小了一半，1958年当哈勃的前学生桑德奇（Allan Sandage，1926–）表明哈勃原来以为的星系中最亮的单星，事实上是一些嵌入气态星云的高光度星集，哈勃常数进一步向下修订到大约100公里／秒／秒差距。这两次哈勃常数的修正都减轻了宇宙年龄与地质年代尺度的冲突。

然而人们已经认识到，这种对宇宙年龄的定义过于简单，因为如果宇宙的膨胀减慢，哈勃常数的值将会发生变化。在20世纪50年代和60年代，哈勃和他的继承者们期望这些问题能早点有个定论。他们没有定论，而且不确定性和不同意见直到今天仍旧存在。

（钮卫星译）

第九章　扩展着的天文学视野

天文学的历史终于何处？什么时候开始了不作为历史的天文学？各个学科的科学史家都觉得越靠近现代，这个分界就越不可靠，天文学史家也不例外。历史上所有天文学家中的绝大多数至今还活着，铺天盖地的出版物数量如此巨大，就是阅读每一篇文章的标题也几乎不可能。更糟糕的事情是，以前天文学家们之间的书信往来——一些通常由后代保存的文件——正在被电话、学术会议喝咖啡时的交谈、电子邮件等等东西代替，很少有什么交流留下什么痕迹。但是用一个历史学家的眼光来考察现在，我们的任务也不完全是无望的，因为已经很明白，某些当代的进展在未来的历史学家眼里会具有基本的、持久的意义。这些进展往往涉及一些理论，需要对物理学有很好的掌握才能理解，所以大部分在我们的讨论范围之外。但是数据必须在释读它们之前就获得它们，而在获得数据过程中甚至读者们——作为纳税人和选举人——也在其中扮演了一个角色。



延伸人类感官："更多的光"

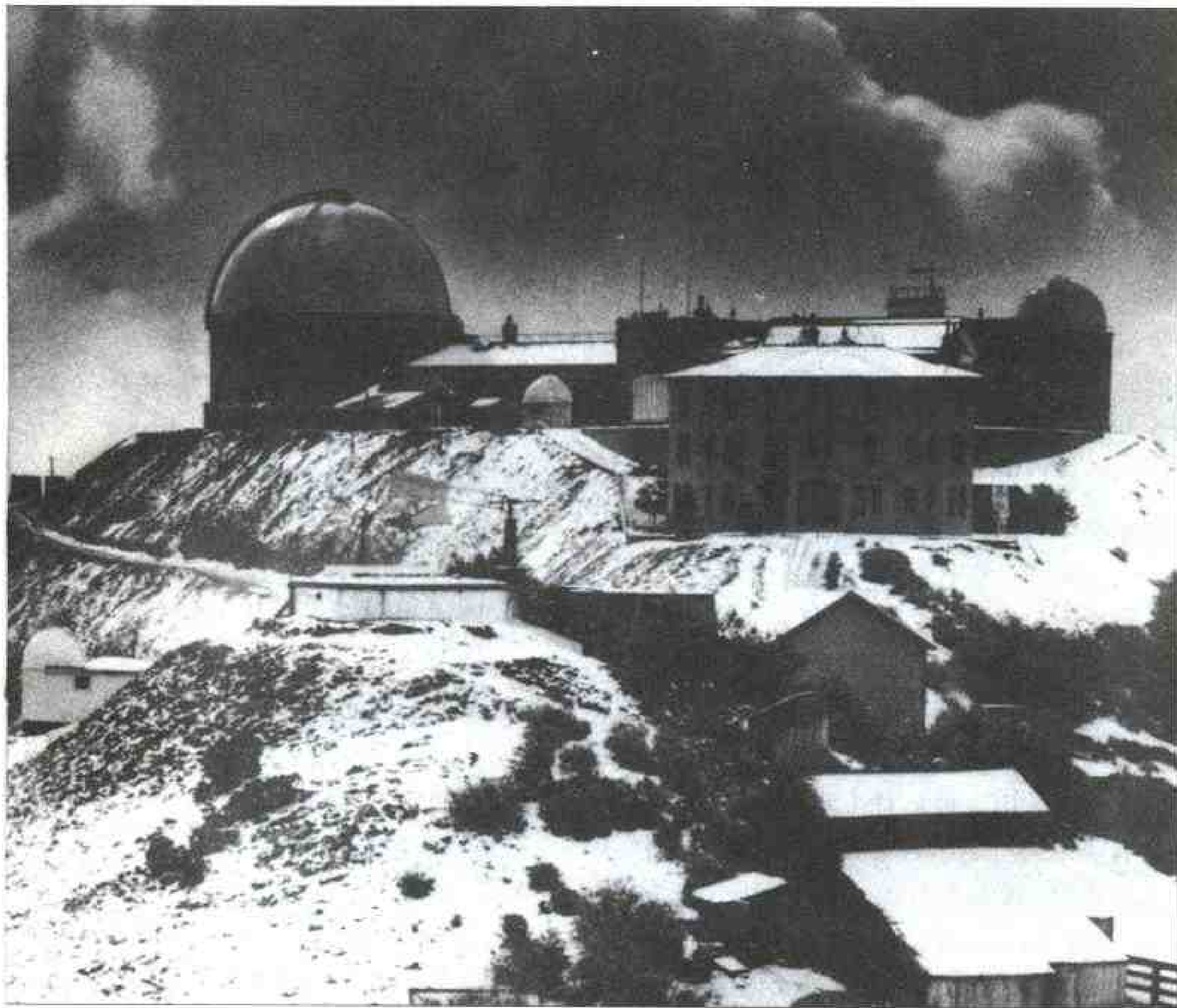


1986年欧洲太空飞船乔托号看到的哈雷彗星的核（冻结的核心），照片显示出一个暗的土豆状的核，测得尺寸大约为16×8公里（10×5英里），围绕着核有喷发活动。

不像许多自然科学家，天文学家没有一个放在拷问台上的自然——用17世纪弗朗西斯·培根的话来说，他不能"把自然拿来审问"。物理学家和化学家们可以设计一个受控实验，像一个拷问者强迫自然回答对她的提问。只有很偶然的情况下，天文学家能够采取主动。月球已经有过叫做"宇航员"的拜访者了，太空飞船已经开始了飞向太阳系其他行星的探险航程，而1986年至少有5艘太空飞船被发送去拦截哈雷彗星——欧洲空间局的乔托（Giotto）到了离彗核600公里（375英里）处花了10个小时收集数据、拍摄照片。但是在极大多数情况下，天文学家的任务一如既往，搜集和搞清楚自然准备提供给地球观测者的任何信息。

望远镜的发明为伽利略和他的同时代人提供了眼力的延伸，到18世纪末期，观测者们很清楚地明白望远镜的物镜越大，就能看见越暗弱的天体。要求更大望远镜的喧闹声从来没有这样响亮。

到20世纪中期，美国的慈善事业为幸运的美国天文学家提供了优先接近宇宙奥秘的机会。配置有先进仪器的美国天文学家，不仅在对新知识的无私追求中，也



1910年左右加利福尼亚哈密尔顿山上的利克天文台。利克天文台是为了尽可能利用良好的观测条件而位于高海拔位置的第一个大型天文台。主圆顶屋安装了36英寸折射望远镜，右侧是天文台主建筑和天文学家们的住处（在前景中）。

几架安装于夏威夷莫纳克亚火山顶上的望远镜，海拔高度将近14000英尺，位于几乎三分之一的大气层以上。图中的仪器（左侧远端逆时针方向）依次为：英国3.8米（150英寸）红外望远镜、亚利桑那大学2.2米（87英寸）望远镜、加拿大－法国－夏威夷3.6米（141英寸）望远镜、美国3米（118英寸）红外望远镜、加州理工学院亚毫米波天文台10.4米（33英尺）碟形天线、第一台巨大的双望远镜暨9.8米（387英寸）的凯克望远镜（这里看到它正在建造中）、英国詹姆斯·克拉克·麦克斯韦15米（49英尺）碟形天线。

在天文学团体内部为地位和薪水而进行的竞争中，比对手处在了更优势的位置。在上一章中我们看到一些观测者的成就得利于威尔逊山上的100英寸反射镜，或后来帕洛玛山的200英寸反射镜。毫不奇怪，其他国家的同行们也需要可匹敌的设备，但是建造和运行一台大望远镜的花费，往往需要政府甚至国际社会的资助。

不太愿意助人为乐的自然界还制造了另一个困难。直到20世纪70年代世界上大多数的望远镜都位于北半球，那里有绝大多数的加工厂和绝大多数的天文学家。然而在天赤道以南，有丰富多彩的天空：那里有银心方向最密集的星云，有两个麦哲伦星云（它们是不规则星系，我们最近的河外邻居）。似乎命运女神们密谋了要让天文学研究变得尽可能地困难和昂贵。然而，正如我们即将看到的，在20世纪的最后四分之一个世纪里，现代空中交通速度的加快和费用的降低，以及通讯的便利，使得南半球天文台的发展至少在仪器设备上与北半球等量齐观了。但费用仍在继续上涨。

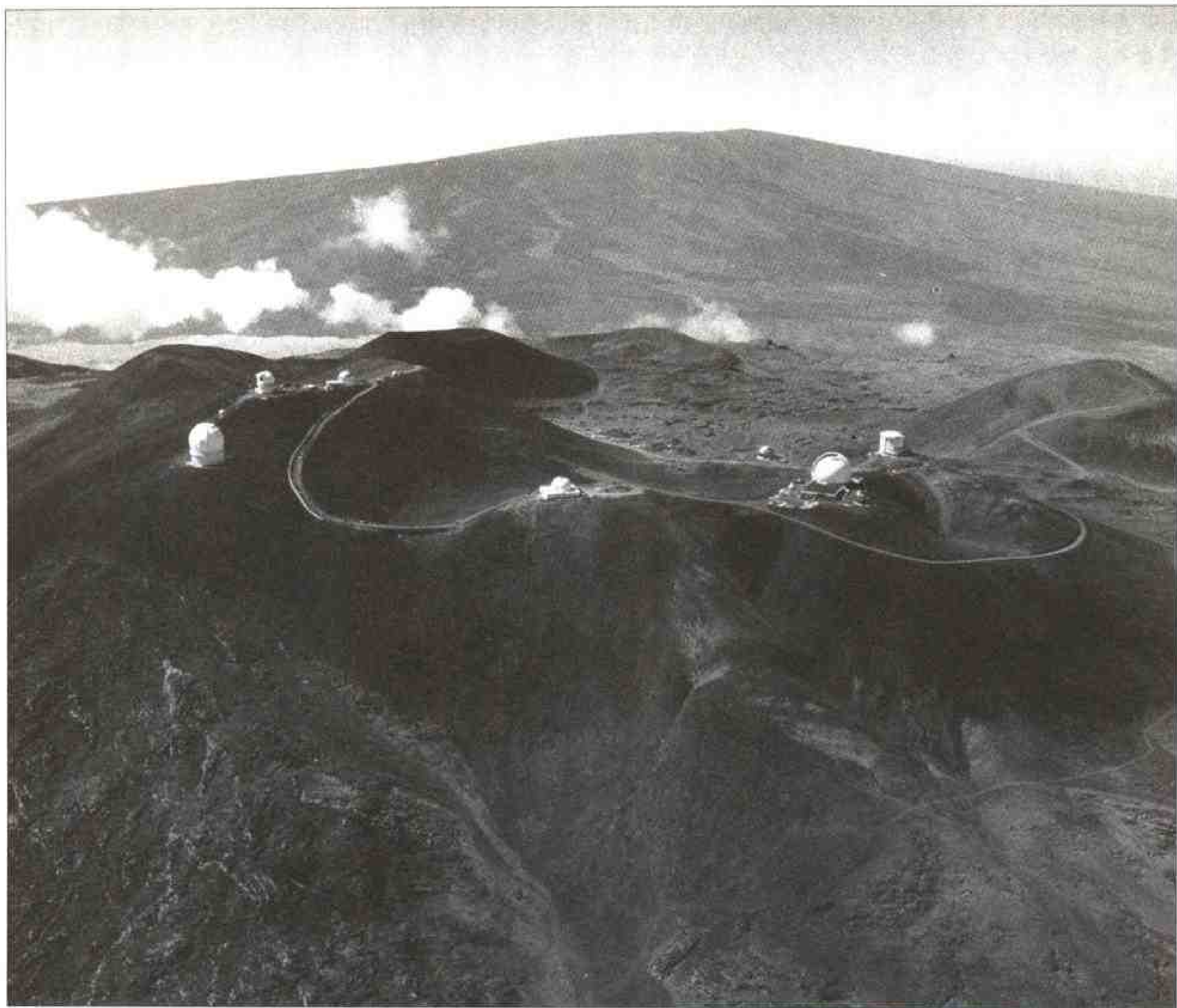
在美国，采取的一个步骤是1957年联合建立了大学天文研究联合组织，建立了三个大天文台：为北天的研究在亚利桑那基特峰建造天文台，那里的3.8米（150英寸）望远镜在1973年开始工作；为南天的研究，在智利建立托洛洛山天文台，那里一台性能相当于3.8米的望远镜在1976年投入使用；还有在新墨西哥州建立了萨克拉门托峰太阳天文台。

其他国家在很多情况下要依赖于国家间的合作，共享建造好的仪器设备。这样一个欧洲大陆国家的联盟主持了智利圣地亚哥北面拉西亚的欧洲南方天文台。那里的一台3.6米（147英寸）的望远镜在1971年被投入使用，现在那里有超过一打的望远镜。这样的国家间合作涉及官方（不是说外交），但是在经济困难时期，相比于纯粹的国内项目，成员国更难背弃他们资助国际合作计划的诺言。

20世纪70年代有另外两个大的南方天文台投入运营：澳大利亚和英国建造的新南威尔士赛丁泉山3.9米（153英寸）的英澳望远镜，还有法国、加拿大、夏威夷合作建造的位于夏威夷莫纳克亚的3.6米（141英寸）望远镜。北天球也没有被忽略。英国、西班牙、丹麦和瑞典在加纳利群岛联合建造了拉帕尔玛天文台，那里的观测条件比欧洲大陆上任何一处都有利，不久荷兰和爱尔兰也加入了这个天文台。

安装这些仪器的选置考虑了尽量要减少围绕地球的大气造成的局限：天文台台址要有较少的云层覆盖，很小的空气抖动，更薄的大气层，还有远离城市灯光——一句话，在仔细选定的高山顶上。自从第一个山顶大文台，加利福尼亚桑塔克鲁兹附近哈密尔顿山的利克天文台建立以来有一个多世纪了，那里的观测从1881年开始，在超过4000英尺的海拔高度进行。今天最高的大天文台是莫纳克亚天文台，高度近14000英尺，这个高度对观测人员和维护人员的生理产生了挑战。无需强调，这些台址的荒僻进一步增加了研究费用。

同时，由于最近几十年的技术革新，信息的采集和分析变得更为有效。19世纪末期为天文学家采集数据带来革命的照相底片，作为光线收集器来说事实上是不充分的。极大多数撞击到照相底片上的光子被反射了回去，只有2%的光子用在敏感的表面上成像。20世纪80年代高速发展的对光敏感的电荷耦合器件或叫CCD（对录像机有重要的商业价值）使天文学家能够以超过70%的效率吸收光子。这意



味着1990年一台30英寸的望远镜能够记录的光子数目超过1960年的200英寸望远镜。另外，获得电子图像，观测者能够察看观测的进程，因此可以消除过度曝光或曝光不足的浪费问题。电荷耦合器件还提供了一个便利——它们可以随行星际探测器或像哈勃太空望远镜这样的轨道天文台飞到空间，图像通过无线电联系传回地球。

现代计算机的高速度不仅用于电子图像的处理，也用于驱动望远镜和达到"主动光学"。在大型反射望远镜制造中有一个长期存在的问题是，当仪器向各个方向倾斜时，主镜在自身重力作用下会弯曲变形。如今这种变形可以机械地控制，主镜背面各个位置的压力被连续地改变，以此来补偿内部应力的变化。类似地，望远镜上空大气的连续变化也可以通过把光引入一个薄的可变形的反射镜来补偿，这种反射镜跟随大气的变化每秒变化许多次。当天空旋转时追踪一个天体，是计

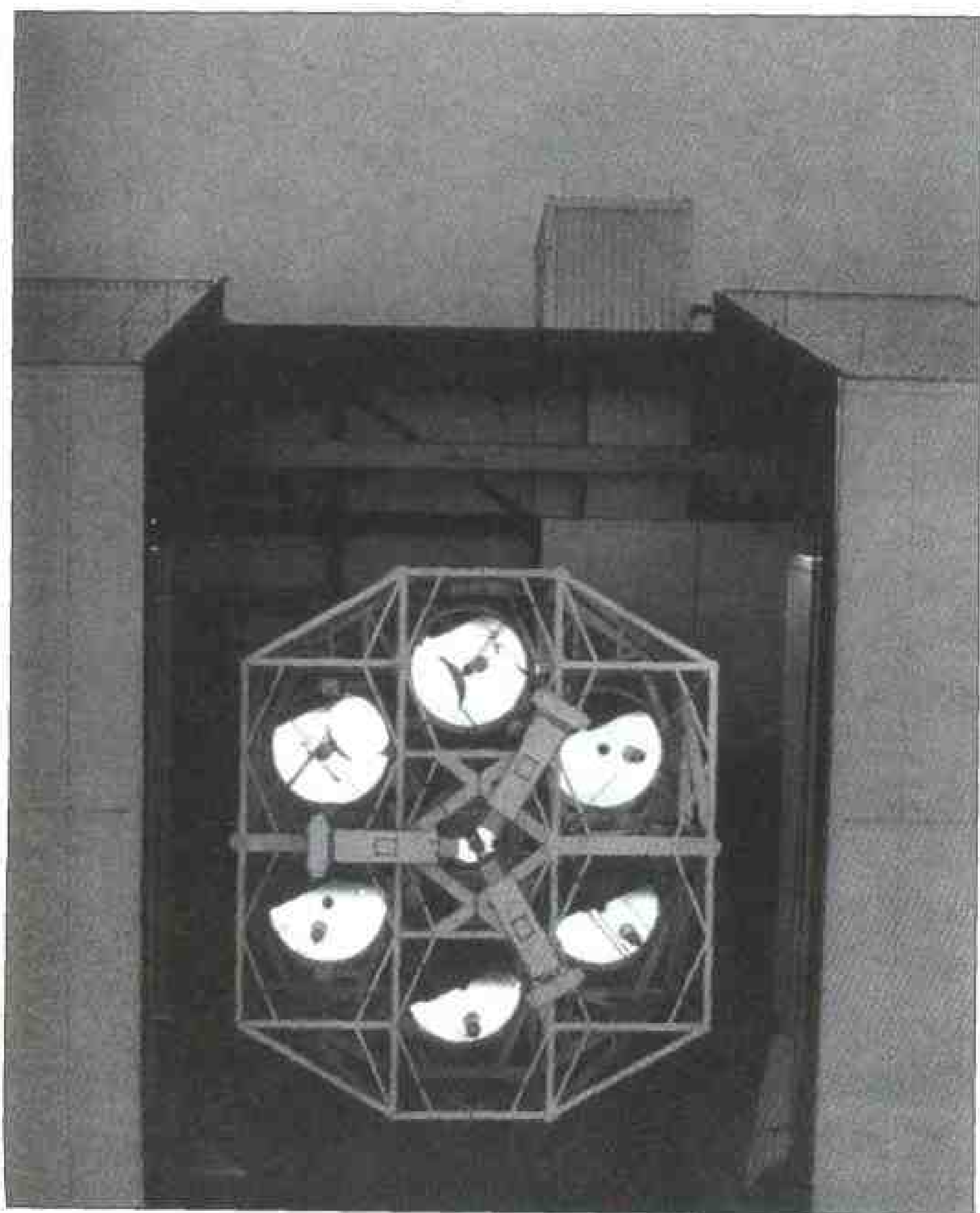
亚利桑那州图森附近霍普金斯山惠普天文台的多镜面望远镜，1980年全部投入运转。它由6块相同的反射镜组成，每块直径1.8米（6英尺）。所有六个成像聚集于一个共同的焦点，因此相当于一块直径4.5米（15英尺）的单块主镜。

算机可做的另一项工作，所以赤道装置现在可以省略了，代之以更简单便宜的上下、左右运动的地平经纬仪。

作为一个后果，像威廉·赫歇尔和威廉·哈京斯这样的业余天文学家能够活跃于这门科学的最前沿的时代一去不复返了，业余天文学家确实还可占据舞台一角，但那是职业天文学家忽略的领域，如搜寻到来的彗星，流星雨期间观测和计数流星或者监测变星。在其观测时，天文学家对一台大仪器可以达到完全控制的日子也一去不复返了。现代的望远镜依赖于一个专家组对其做出连续的护理。观测已经变成了一个合作演习，在这个合作中天文学家发现自己受控于专家维护组，他们的专门技术就像工程之于物理学，或者计算之于天文学。曾经只进行他们自己的研究的各个国立天文台现在发现，他们得为不断到访的天文学家们维护设备。

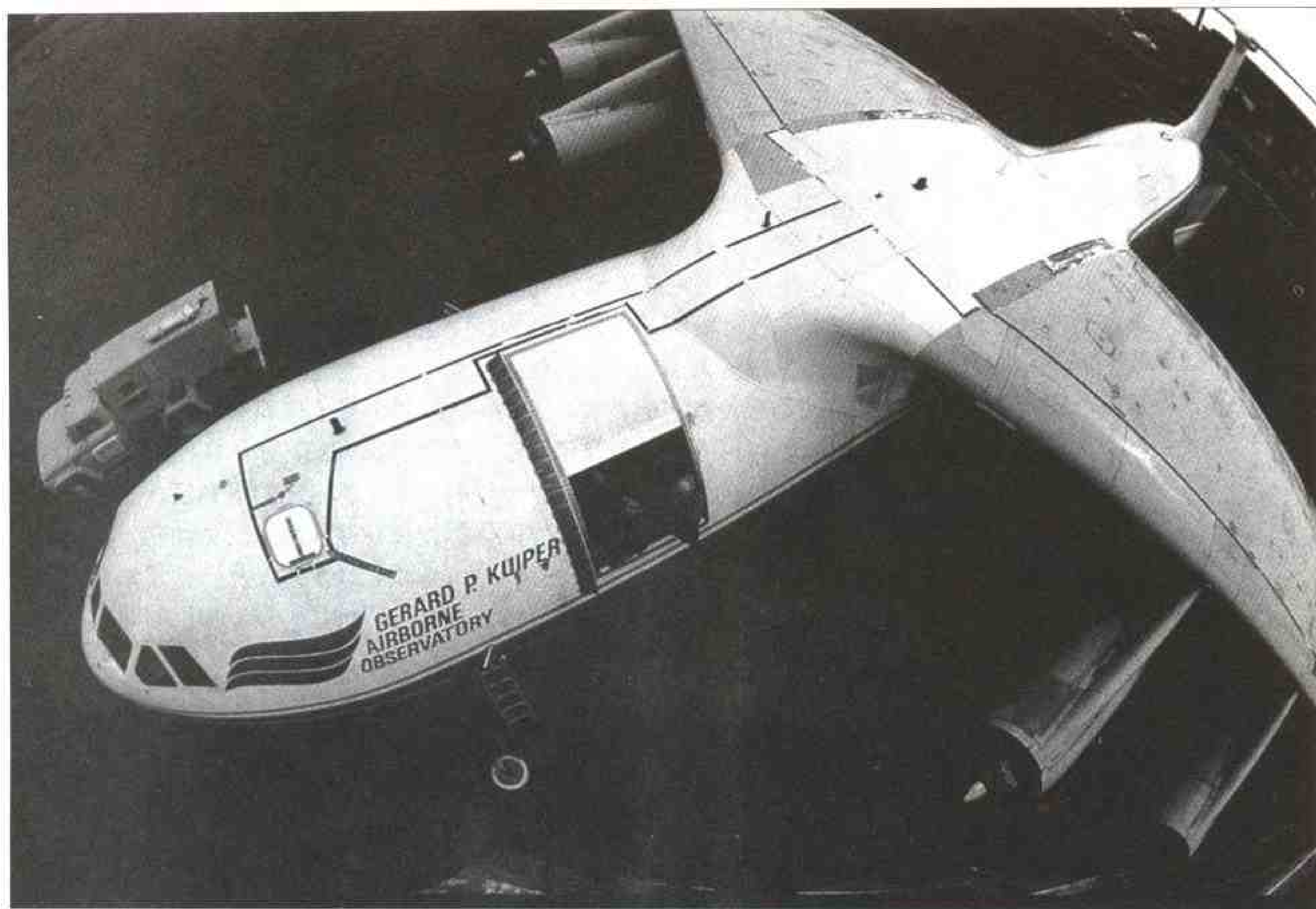
下一代望远镜

最近建造的大部分望远镜的主镜，直径小于帕洛玛山的200英寸望远镜。1976年前苏联在泽连丘克斯卡亚建造了6米（236英寸）的望远镜，但这台望远镜令人失望，一些人认为已经达到了有效主镜直径的极限（受望远镜上空大气扰动的限制）。但是高山顶上的新望远镜的经历表明，大部分扰动来自圆顶屋附近甚至内部、甚至仪器自身内部的气流。可以采取某些措施来减轻这些扰动，所以大主镜望远镜的建造再次引起注意。即使如此，为了这样一台大型仪器能有效工作，需要许多最新技术来支持。



这样一台“下一代望远镜”（NGT）的一大笔令人望而却步的花费在于主镜的制作和成形、制造控制望远镜的机械装置和建造带旋转圆顶屋的建筑。后两者由望远镜的重量和焦距长度决定。短焦距的大曲率主镜（因此需要一个相对较短的管子和较小尺寸的圆顶屋）用传统的方法难以成形，但是，如果制造主镜的材料在熔化时转动起来，并慢慢地等到它冷却，主镜所需的大致形状就能铸成。这是因为圆形容器里的液体在转动起来时，向容器外面方向堆积起来，它的表面形成一个（近似的）抛物面，这是望远镜主镜的理想形状。

最大的“下一代望远镜”莫纳克亚天文台的凯克望远镜Ⅰ在1990年部分投入使用。它的主镜直径为9.8米（387英寸），由36块六边形的镜子组成，当这台望远镜首次“看见光明”时已经被装上了其中的9块镜子。一台匹配的凯克望远镜



柯伊伯机载天文台的91厘米（3英尺）望远镜，1975年首次工作，由洛克希德C-141运输机携带。这个天文台正常的飞行高度是36000英尺，高于大气层里绝大多数的水蒸气，其望远镜（从长方形舱门往外看）用于红外和亚毫米波观测。该天文台于1995年退役，以节省资金投入更具雄心的计划。

Ⅱ位于附近，当它们被连接起来使用时，这两台仪器的分辨率相当于一台直径等于这两台望远镜圆顶屋之间距离那么大的望远镜的分辨率。

哈勃太空望远镜

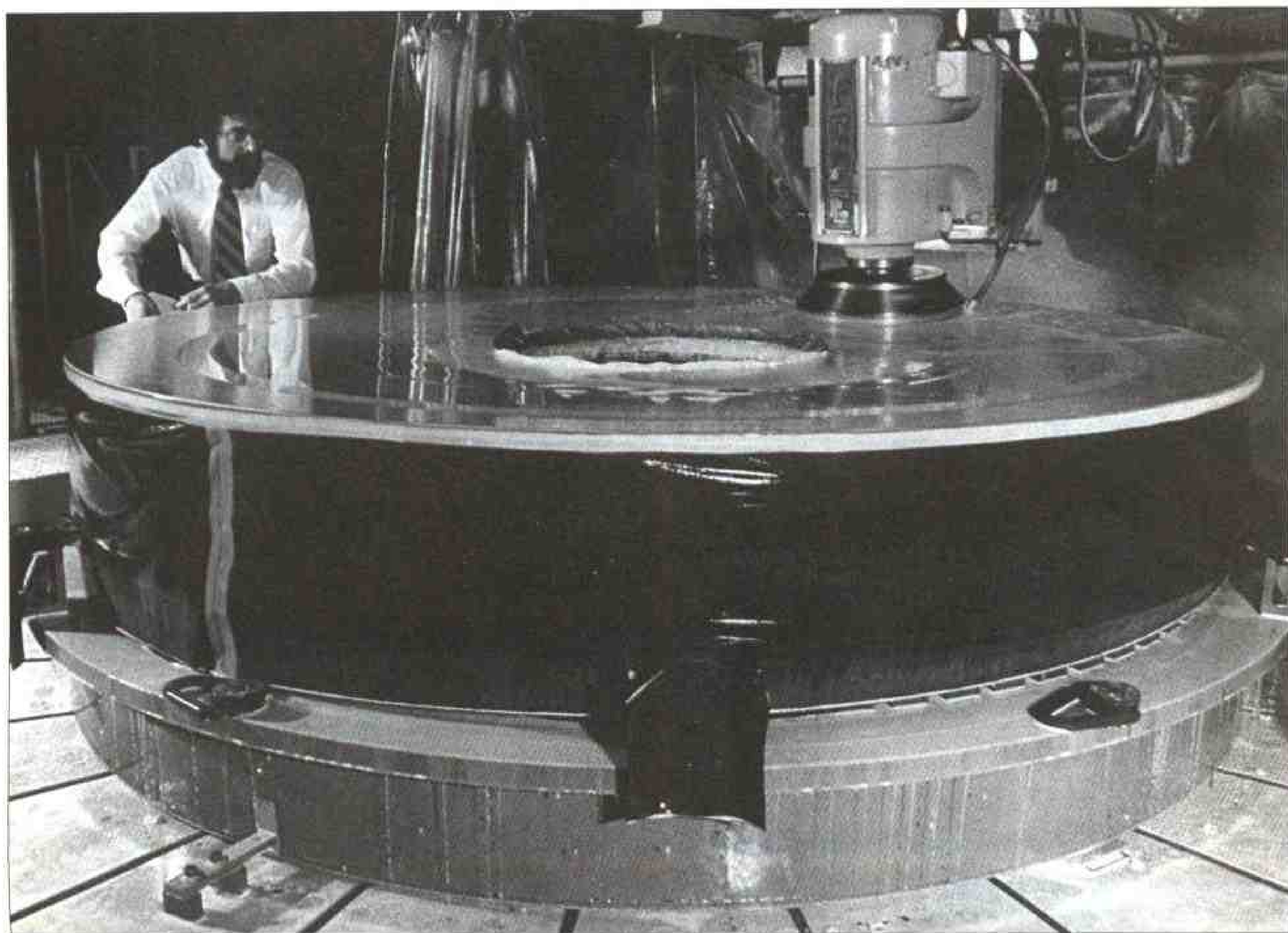
然而，今天的天文学家不全依赖于地基的天文台，因为火箭技术、轨道卫星和太空飞船——建立在军事用途或提升国家威望等基础上的进展——已经打开了一条把观测仪器放置到外太空中去的道路。到目前为止，这类努力中最为切实的是哈勃太空望远镜（HST），1990年4月从发现号太空飞船发射，轨道高度是600公里（370英里）。它的主镜直径2.4米（94英寸），在地基仪器中属于中等大小，但是在外太空它的精度远远超过其地面上的竞争者。哈勃太空望远镜主镜的光滑度远远超过了以前任何一台天文仪器的标准，不幸的是，表面制造的高度精确但形状错误，望远镜的观测远远没有达到预期的效果。1993年从太空飞船执行的一项维修任务成功地把一些矫正元件安装在光路上。随后，高度光滑的主镜表面开始盈利，形成了一系列壮观的高清晰度的图像，最值得一提的是它在遥远的室女星系团中发现了数百颗造父变星。

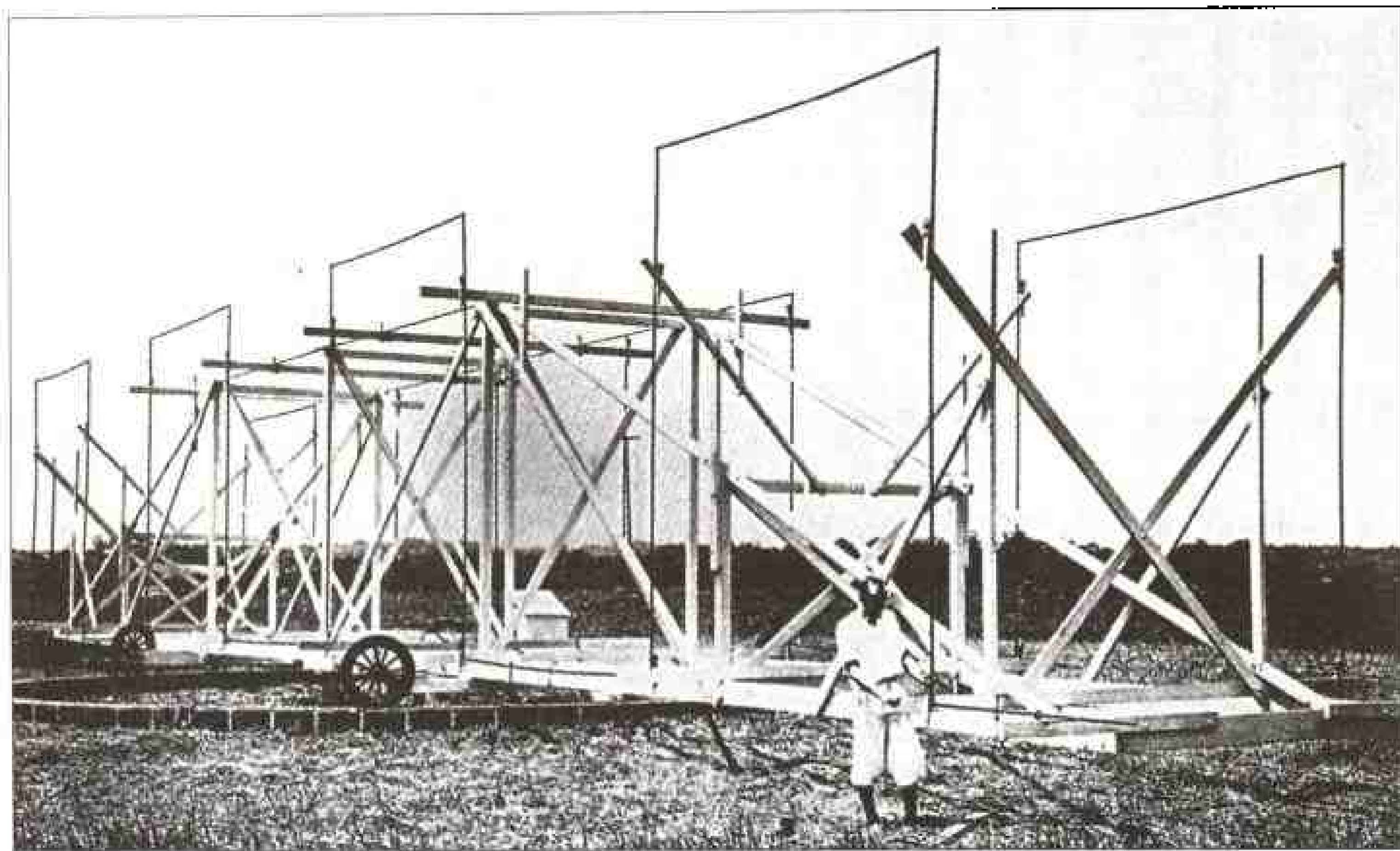
射电天文学的看不见的宇宙

哈勃太空望远镜主镜制造工作的开始。到工作结束时，切割轮（右侧）总共从镜面上切下了130公斤（285磅）的玻璃，主镜直径为2.4米（94英寸）。然后镜面被抛光和涂层。它的期望精度是十分之一角秒或更好，但是镜面被磨成了错误的形状。三年后发射的航天飞机把一个矫正元件放置在了望远镜的光路上，此后的结果超过了人们的期待。

可见光，这对人眼起响应的电磁辐射，只是穿透大气层的辐射线中的一个波段。另外更宽的波段包含了波长从1毫米到30米的无线电波。这个波段的辐射是来自天体的“恒星使者”，它携带着新的消息。首次说明这一点的线索出现于1932年。那一年，贝尔实验室的一位工程师卡尔·央斯基（Karl G. Jansky，1905－1950年）正在使用一个可动天线研究新近开辟的越大西洋无限电话服务的干扰因素。除了雷电干扰，央斯基遇到一种周日变化的背景噪声。这些信号被证明是来自银河，而且以银河系中心方向为最强。

央斯基的结果没有引起多大注意，但是1937年另一位美国无线电工程师雷伯（Grote Reber，1911－）为他自己造了一个抛物面天线，开始在他的空闲时间继续央斯基的工作。在将近十年时间里他绘制了全天射电源的等强度线。这一研究活动的范围还包括了战争年代，战时雷达操作员在寻找敌方的活动时，也遭遇了来自外太空的“干扰”。1942年，海伊（James S. Hey，1909－）和他在英国军方操作研究小组（British Army Operational Research Group）的同事们正在





卡尔·央斯基（可见于图中前景）建造的天线。它带有轮子，可以指向任何一个水平方向。央斯基发现，除了闪电的霹雳声等不规则的声音，他接收到一种嘶嘶声，它的强度变化周期为24小时差4分钟，这是天球周日自转的周期。后来证实这种嘶嘶声来自银河。

调查设想中的德国对英国雷达的干扰台，后来发现强大的无线电辐射事实上来自太阳。

战争一结束，退役的物理学家以他们的专业技术发展了“射电天文学”这一门新科学，废弃的军方仪器还可供他们使用。战争结束后仅几个月，海伊发现了第一个近域（分立）无线电辐射源，两年后赖尔（Martin Ryle，1918—1984年）和史密斯（F.Graham Smith，1923—）在剑桥确定了北天最强的这种射电源的位置。

这样的“射电恒星”能够被证认为可见的天体吗？这样的证认——或缺少这样的证认——对于了解射电星的本质而言显然是根本性的问题。还有一个更专门的理由：在证认做出之前，射电天文学家将忽略第三维即距离。在射电源被证认为一个可见天体之前，它的距离是不知道的，而天体可见光谱的红移（见第317—319页）可以转化为距离。根据熟悉的理论，红移越大，退行速度也越大，天体距离也就越远。

不幸的是，第一批射电望远镜不够精确，难以确认射电源在天空中的位置。1949年有了明显的进步，三位澳大利亚射电天文学家博尔顿（John G. Bolton）、斯坦利（G.J. Stanley）和斯里（O.B. Slee）成功地把三个分立射电源确认为光学天文学家熟悉的天体，这中间包括蟹状星云，哈勃在早年把它认作是1054年超新星爆炸的遗迹。

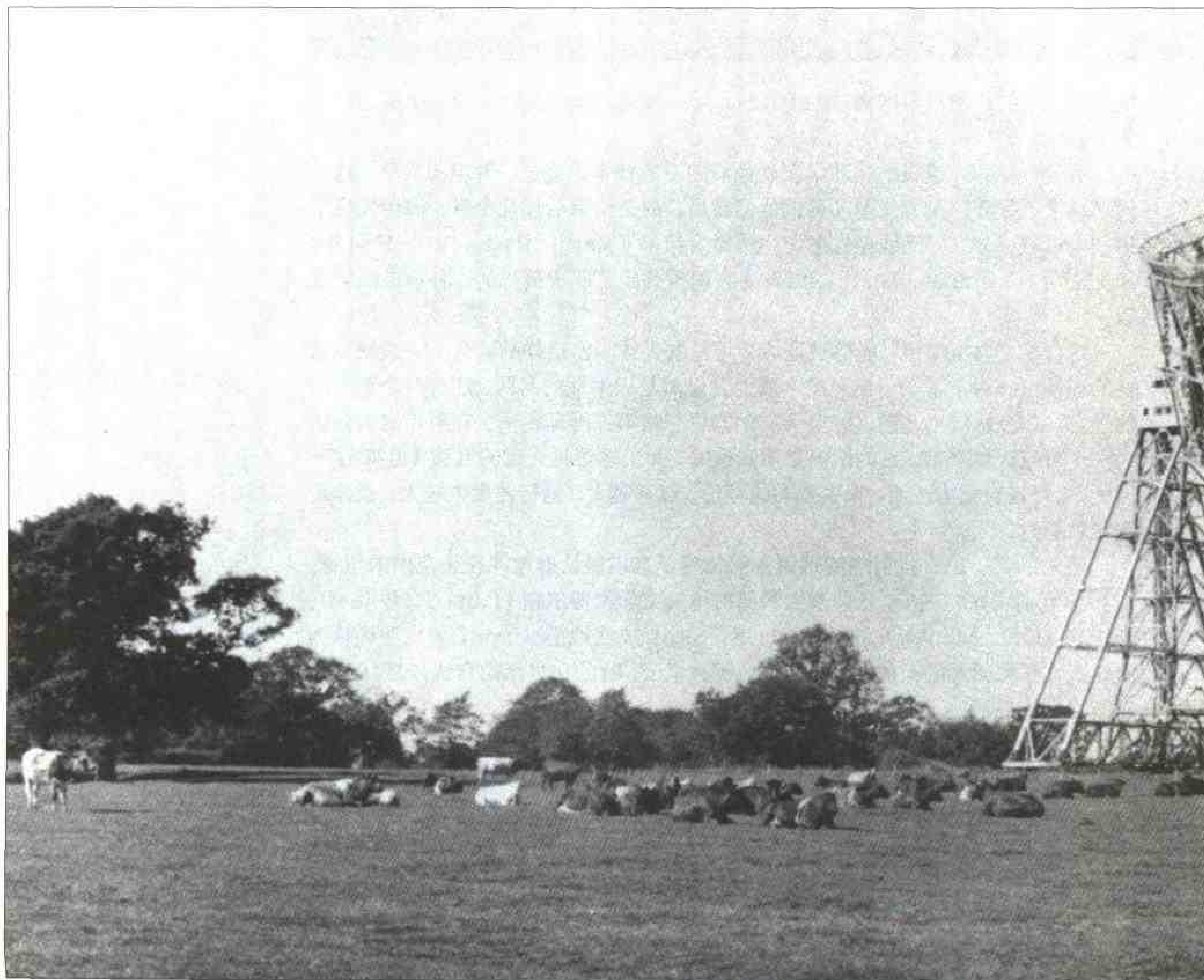
两年后，史密斯获得了射电源天鹅座A的精确位置，这使得帕洛玛山天文台的巴德（Walter Baade）和闵可夫斯基（Rudolph Minkowski）能够确认它是一个奇异外观的天体，巴德把它解释成是遥远的正在相撞的两个星系。当这个罕见的双亮点外观被弄明白是横越星系的尘埃带所造成的之后，那种解释就不得不放弃了。但是天鹅座预示了一个潜在的射电天文学的宇宙。

当这样的证认增多，人们开始慢慢明白，位于遥远距离处的天体，尽管是个微弱的发光者——它们如此微弱，以致有很多用光学望远镜可能永远探测不到——它

们仍然可能是一个很强的射电源。射电天文学家正在“看”这些源，恰如在很久以前它们的光线刚刚踏上奔向我们的旅程。这意味着，如果宇宙确实如大多数宇宙学家相信的那样，是从它初始的致密状态或“大爆炸”（Big Bang）开始膨胀，射电天文学家能够观测到曾经相当接近大爆炸时刻的区域。这使得人们可以利用射电天文学的证据来检验宇宙学理论。

射电天文学和宇宙学辩论

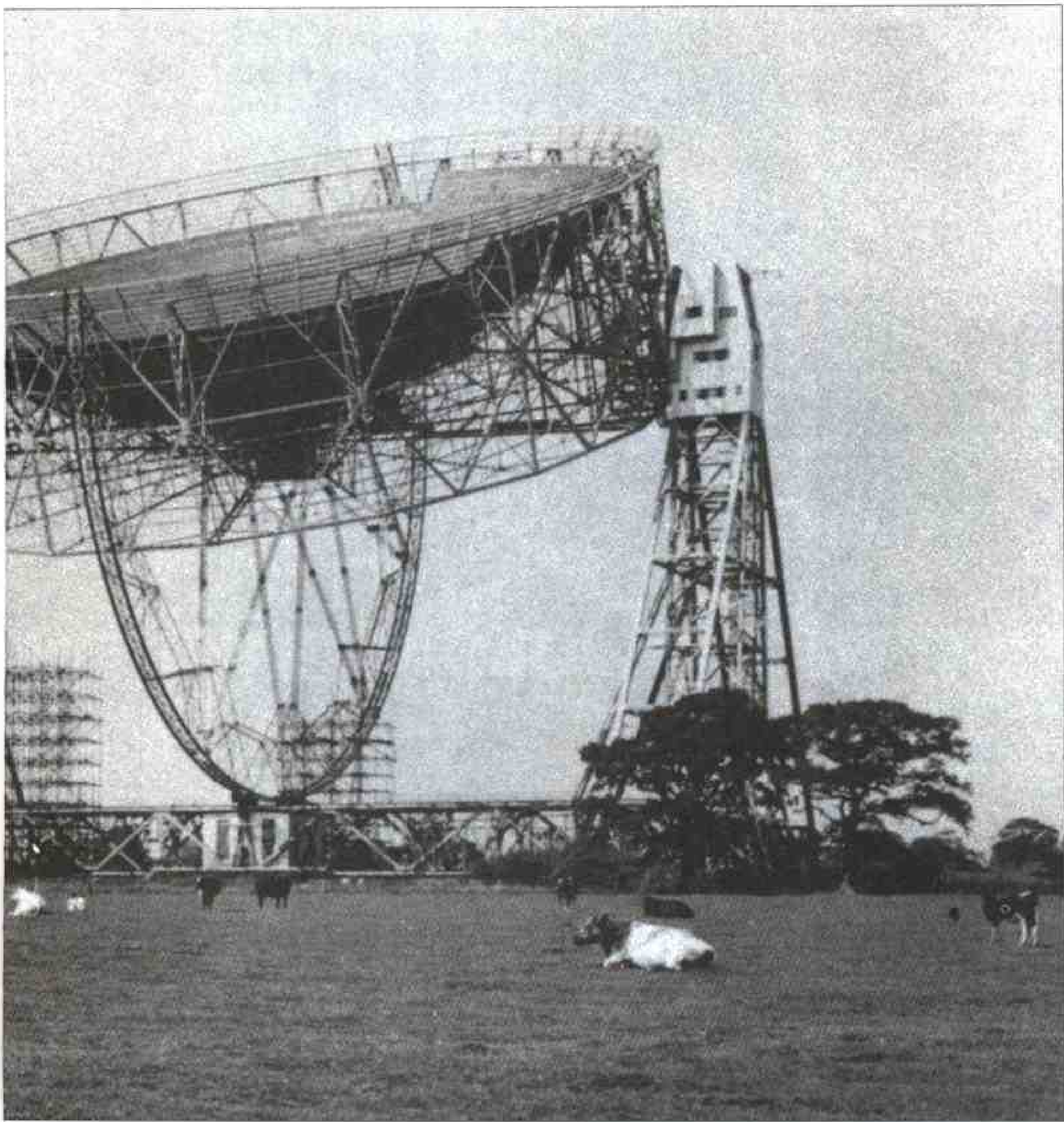
1948年三位剑桥天文学家霍伊勒（Fred Hoyle，1915－）、邦迪（Hermann Bondi，1919－）和戈尔德（Thomas Gold，1920－），他们三个没有一个迷恋宇宙有一个开始的观点，因此他们提出了一个理论，该理论认为宇宙在大尺度上，



包括在各个时间和各个地方，都是一样的。在这个“稳恒态”宇宙中没有开始，也没有结束。星系彼此之间在退行不是大爆炸（霍伊勒的术语）的结果，星系在各个方向上简单地飞离，就像烤蛋糕时蛋糕上的葡萄干随着蛋糕膨胀而远离。为了填补星系退行后留下的虚空并保持宇宙总的外观，三位朋友假定了星系际空间物质的创生，物质的产生率被要求要足够形成新的星系。

如果稳恒态宇宙学家是对的，那么遥远的过去宇宙主要构成部分的分布跟今天的就是一样的；如果大爆炸宇宙学家是对的，那么宇宙在更年轻更小的时候这些宇宙构成部分会更集中。这是一个射电天文学家或许能够提供答案的问题。

一架似乎适合这个任务的射电望远镜也在剑桥，在那里赖尔首创了一种技术，几个相匹配的射电望远镜被组合起来，其中一个或几个能够移动，被用来一起缝合一幅射电天图，其效果相当于一架巨大的（非常不切实际的）射电望远镜所给



曼彻斯特附近乔德里尔班克（Jodrell Bank）的250英尺直径射电望远镜，1957年6月20日它尚未完工的碗状碟面首次倾斜。这个碟面重1500吨，由从军舰上回收来的塔楼支撑。同年10月这架仪器投入使用，正好使得自由世界能及时监视携带苏联卫星的航天火箭的飞行——一个未曾预见到的用途使得这架望远镜闻名世界。伯纳德·洛韦尔在建造这架巨大的但完全可动的望远镜时克服了许多技术困难，他的功绩使得采用可动碟面成为各地大型射电望远镜的一个标准形式。

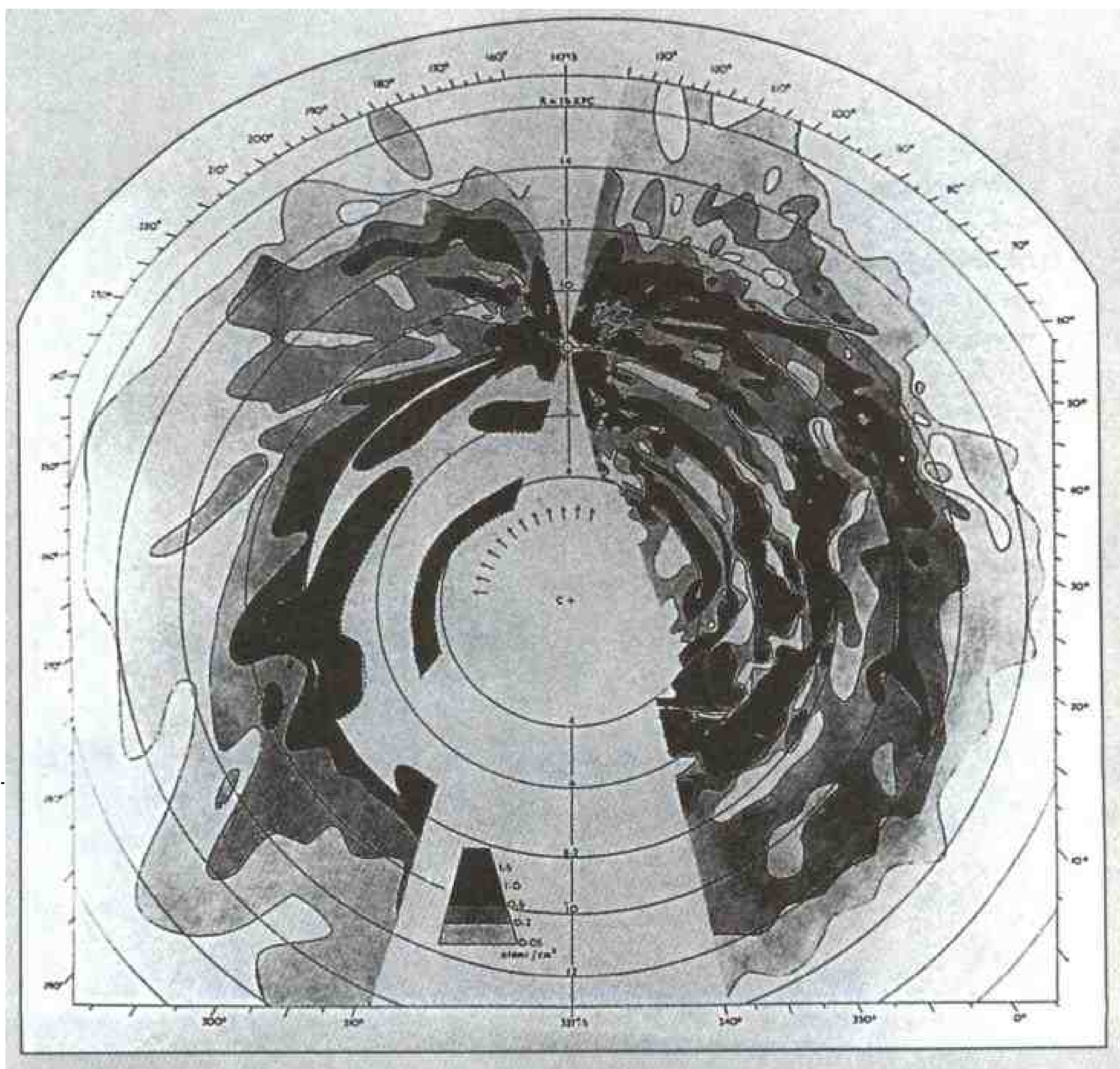
射电天文学和银河系的旋涡结构

第二次世界大战期间，荷兰天文学家被剥夺了大部分设备，因此他们发现自己不得不致力于理论问题。正如我们已经看到的（294—307页），银河系具有旋涡结构的猜测被证明是很难证实的，这不仅是因为身处银河系之中的人类无法避免洞察他们所在的恒星系统结构的困难，还因为尘埃云阻挡了大量星系中的恒星。莱顿天文台的让·奥尔特认识到，因为它们的波长较长，无线电波也许能穿透尘埃云，他鼓励他的学生亨德里克·范·德·赫尔斯特（Hendrik van de Hulst，1918—）去研究无线电波是怎么回事。

赫尔斯特在1945年发表的一篇论文中指出，电子在"中性"氢原子内部的转动发生逆转时，将会发射出波长为21厘米的电磁波。在任何一个单个的氢原子中，这种自发逆转的概率是几百万年发生一次；但氢是宇宙中含量最丰富的元素，所以银河系内可能有足够的逆转发生，而且能在地球上观测到。

1951年，先是在哈佛大学天文台，稍后是在荷兰和澳大利亚，上述预言被证实。接着，后面的两个研究小组着手一项合作计划，绘制出银河系不同方向21厘米线的强度和速度。这是一项艰苦的工作——莱顿的研究小组在将近两年时间里，使用一个老的德国雷达天线，以每两分半的间隔连续不断地用手动定位——但在结果图上，银河系的旋臂最后终于出现了。

令人伤心的是，叶凯士天文台的威廉·摩根已经完成了一次银河系结构的光学调查，他用高亮度的O型星和B型星描绘出了旋臂结构，他在1951年美国天文学会圣诞节的聚会上对自己结果的简单介绍，使得听众们相信银河系的旋涡结构已经被展示出来了。但在第二年春天摩根病倒了，当他能够重新回到工作上来的时候，他的草稿已经被射电天文学的成就所超越。



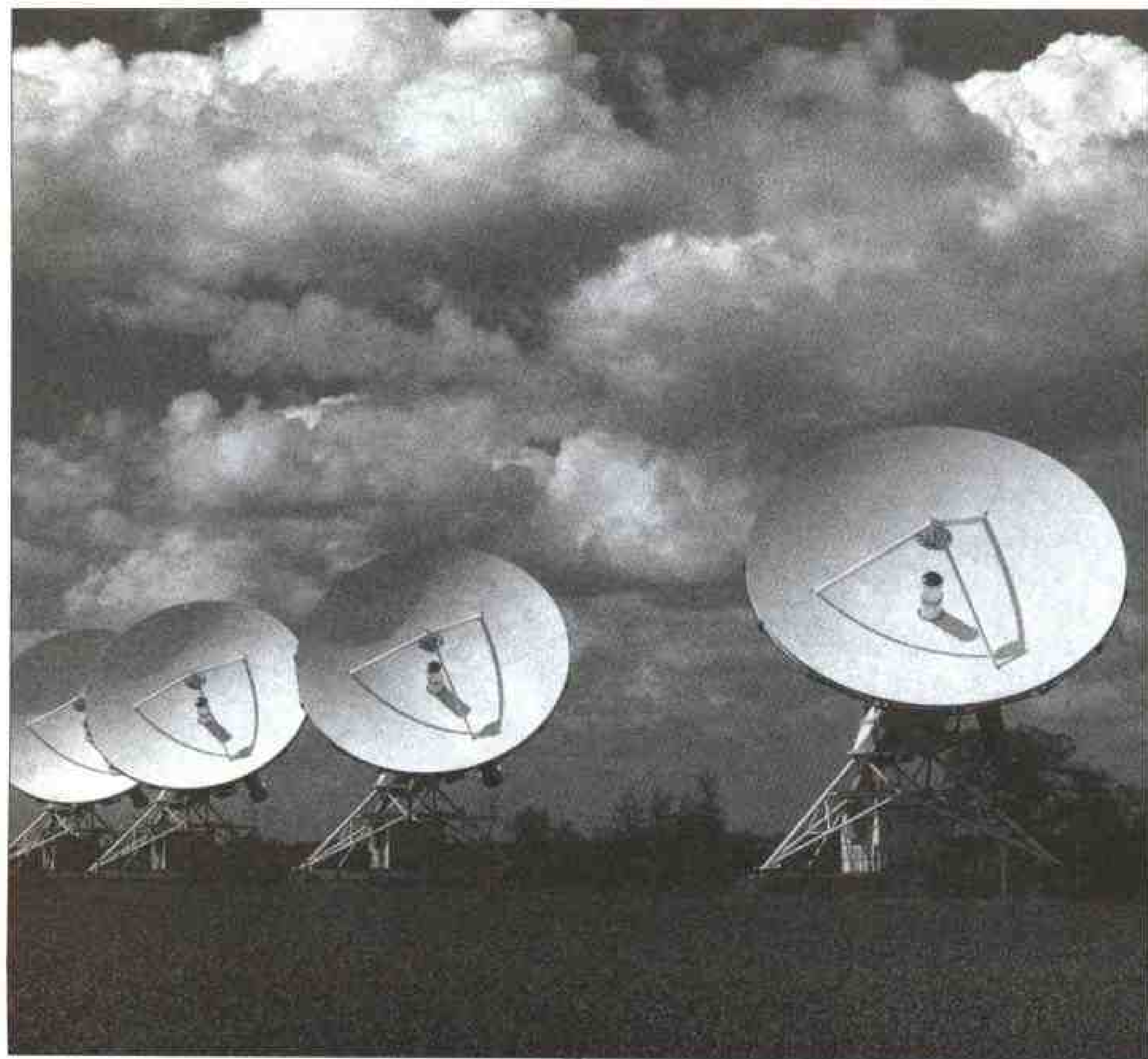
1958年展示银河系旋涡结构的复合图，荷兰和澳大利亚的射电天文学家根据中性氢的分布得出该图。图中央是银心，在银心上方8200秒差距处标注了S的是太阳所在的位置。左侧一半的图主要是悉尼观测者的工作成果，而右边一半更详细的图是荷兰天文学家的成果。在两幅半图的接合处有很合理的一致性。

出的。赖尔跟霍伊勒没有交情，赖尔不止一次宣布他的反驳稳恒态宇宙理论的观测结果，而霍伊勒不止一次地拒绝这些观测结果。

最后这个问题被通过另外的途径解决了——至少是临时地解决了。20世纪40年代后期，伽莫夫（George Gamow，1904－1968年）和来自乔治·华盛顿大学的阿尔法（Ralph A. Alpher，1921－）和赫曼（Robert Herman，1914－）预言了后来被叫做大爆炸的一个结果，在今天的整个宇宙中有一种剩余辐射，它各向同性，温度为绝对零度以上5度（5K）。伽莫夫勾勒了爆炸开始几分钟里元素从辐射和核粒子的原初混合物中形成，他把这钟混合物叫做“伊伦”（ylem），但是因为缺少一种稳定的原子量为5的元素，这一理论步入了困境。尽管这项研究得到了很好的宣传，但这些观点的重要性由于为元素的形成所设想的过程存在问题而被降低。

在不了解阿尔法和赫曼预言的情况下，普林斯顿大学的迪克（Robert H. Dicke）在1964年提出了他自己的理论，该理论也预言了高于绝对零度以上几度的背景辐射。迪克的小组立刻开始工作，建立一台仪器来探测这种辐射，并检验这一理论。

与此同时，在贝尔电话实验室附近，两位工程师彭齐亚斯（Arno Penzias，1933－）和威尔逊（Robert Wilson，1936－），正在用原本为测试卫星通讯而设



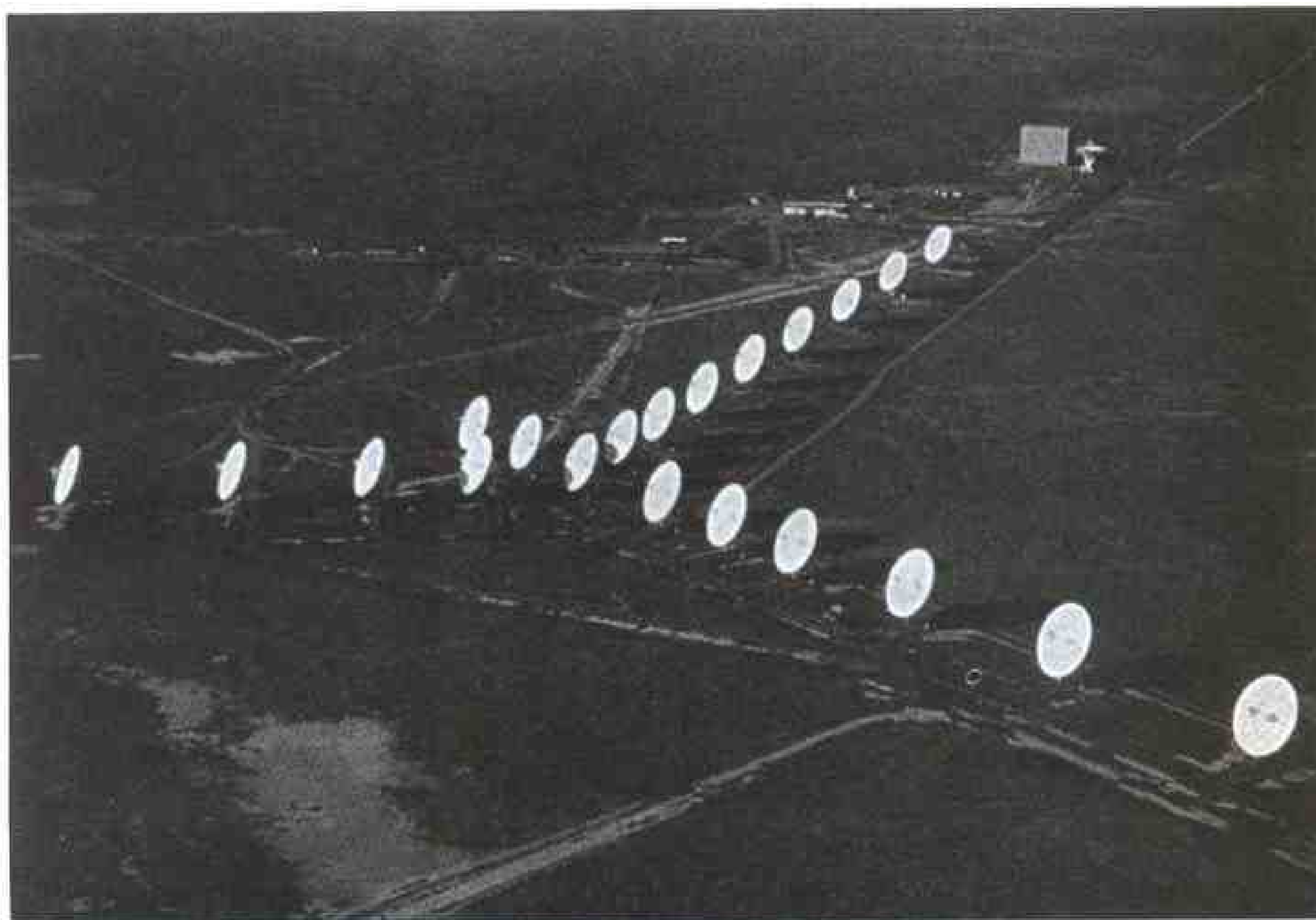
剑桥的赖尔射电望远镜。它由四个固定的和四个可在轨道上运动的碟面组成，每个直径13米（43英尺），分布在东西向约5公里（3英里）长的基线上。在数天时间里组合使用不同位置上的小射电望远镜，可以得到与一架巨大尺寸的望远镜得到的同样的信息。马丁·赖尔爵士发明的这种综合孔径技术，使他赢得了1974年的诺贝尔物理学奖。

计的反射天线工作，前面这些理论观点与他们所关心的问题显然相去甚远。他们以极大的耐心追踪和消去干扰源，包括两只栖息的鸽子，但是他们发现，有一种未加解释的辐射来自天空的各个方向，对应的温度大约是3K。他们向迪克咨询引起这种辐射的可能原因，不料获悉他正在积极寻找他们已经找到的东西。

在许多宇宙学家看来，1964至1965年“微波背景辐射”的发现，让决胜的天平发生了决定性的倾斜，稳恒态宇宙理论已经步入了被淘汰理论的边缘。事实上，一直促进这个理论的是这样一个观点，即宇宙应该有什么样的结构，而不是就是什么样的结构。稳恒态宇宙理论的创始者曾经指出，这是一个做出明确预言的理论，因此具有易于被证伪的科学价值。而历史学家们还记得早先将天文学界分成两派的一些争论，如关于到底是地球还是太阳是宇宙的中心，又如星云是恒星的集合还是发光的云等等——这些问题的答案被证明不是恰好非此即彼的，而天文学界再次在对立的理论之间分成两派，让历史学家们感到不安。

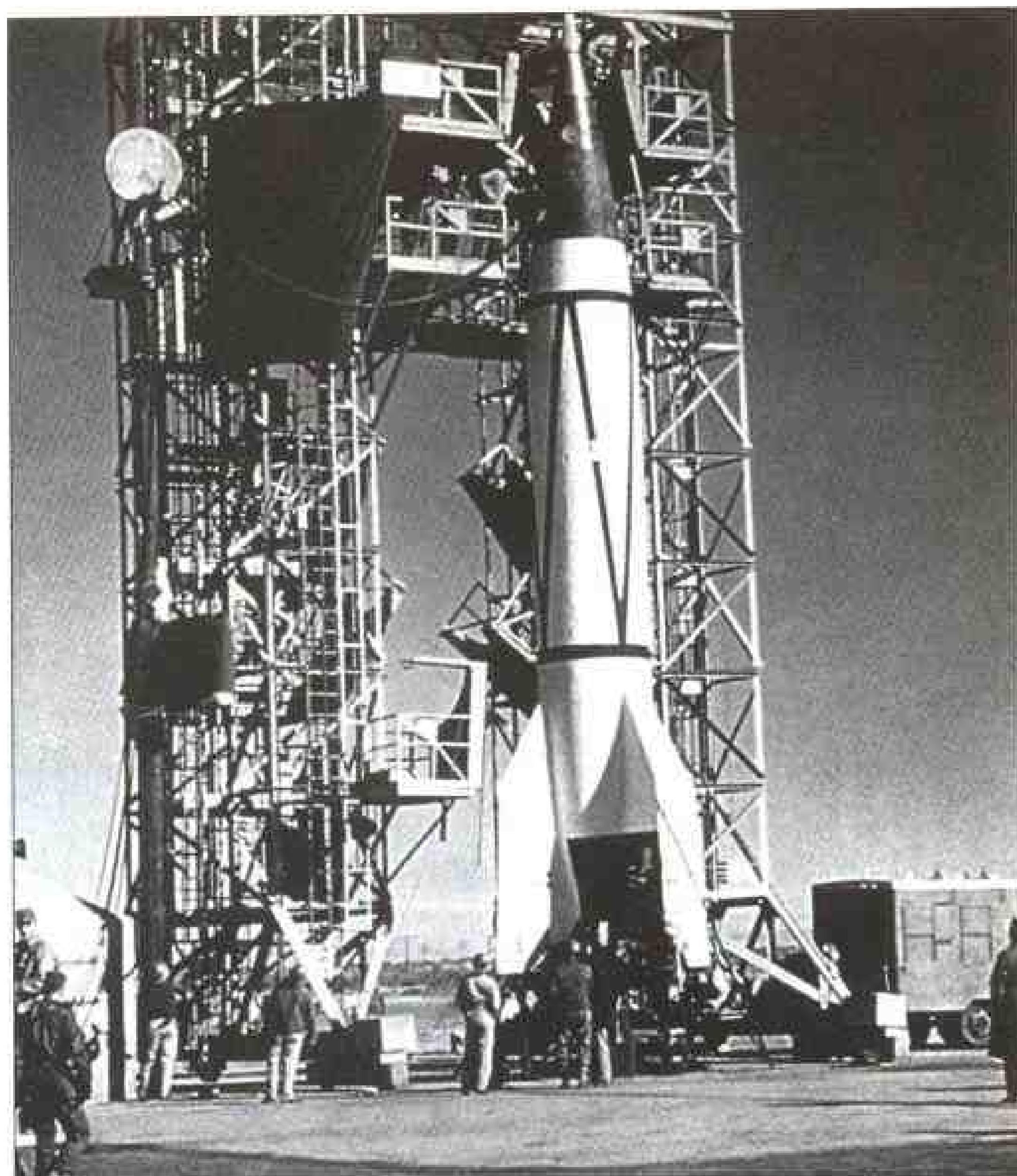
稳恒态宇宙理论和大爆炸宇宙理论都预言了星系向各个方向的退行，而就是对这个事实的解释也能唤起不安。从根本上说，观测事实是，来自小而暗弱的星系的光，转换成光谱后，它们的谱线向红端移动，红移越大，星系就越暗越小。很难怀疑“小而暗弱”意味着距离遥远，但是红移也可能有另外的解释。譬如，宇宙可能是稳定的，光子在穿越星系际空间的旅程中由于某种原因而慢慢损失了能量，波长变得更长了。然而，所有其他的理论都有某些方面的缺陷，而观测到的红移显示它们似乎就表示了一种膨胀。到目前为止，这还是对观测做出的最简单最令人满意的解释。

这里确实有某种方法论上的两难境地：理论宇宙学家要实测天文学家制造“事实”来判定哪个宇宙模型是正确的，但是非常粗略的观测所制造的“事实”



位于新墨西哥州索克罗(Socorro)附近的甚大天线阵射电望远镜。它由27块碟形天线构成，每块直径25米（82英尺）。它们分布成Y形结构的三个臂上，每个臂长21公里（13英里），这些碟面用综合孔径技术连接起来使用。在整个天空的观测中，Y形结构望远镜比同等大小的限制于东西向基线上的望远镜具有更好的全面性能。

需要宇宙学模型的假设，而这本身又是需要观测来证实的。



第二次世界大战末期，美国军队缴获的德国V－2火箭中的一支，它们通常给天文学家们一个在大气层以上研究天空的短暂良机。这是1948年在新墨西哥州白沙火箭发射场的起重架上的一支V－2火箭。V－2火箭有14米（46英尺）高，飞行高度150公里（90英里）。遗憾的是火箭在冲击之下会裂成碎片，所以有必要将包含科学仪器的部分分离出来，以便这些仪器能够被缓慢下降，或者在飞行中通过无线电传送出数据。

被大气隐藏起来的宇宙

正如我们已经看到的，可见光和无线电波是能够穿透大气层的电磁辐射的。事实上，无线电波不受恶劣天气的影响，射电望远镜日夜都可以工作，还可安装在气候条件不好、海拔低的地方。但是光谱的其他区域——那些位于近红外到无线电之间的辐射、还有短波长的紫外线、X射线和γ射线——完全被大气层遮蔽了。今天，作为太空飞船发展的一个成果，全波段的研究已经实现并产生了许多新的研究领域，天文学与物理学的结合比以往更紧密。不同的波段提供了不同温度部分的宇宙图像。

初期在大气层上面进行观测的尝试采取了用火箭携带仪器的方式。早在1946年，缴获的德国V－2火箭被用来进行首次太阳紫外观测，但是数年之内，V－2火箭被专门为太空研究而设计的火箭所取代。因为火箭只能在大气层外留几分钟，早期飞行器收集的数据只比粗糙的快照好不了多少，它们证明了宇宙还有未被利用的窗口。

这自然激发了天文学的兴趣。对那些想成为观测者的人而言，幸运的是，随着1957年前苏联第一颗人造卫星的发射，太空中的国际竞争带来一批整个系列的天文人造卫星，它们在围绕地球的轨道上收集迄今为止一直遗失的光谱波段的数据。美国在1968年和1972年发射了“轨道天文台”，1978年发射了国际紫外探测器（一项欧洲－英国－美国的联合探测）。美国在1970年启动了小天文卫星（SAS）系列，SAS－1在肯亚角（coast of Kenya）发射升空，得到了一份161个X射线源的表；1972年接着发射了SAS−2，携带了用于γ射线观测的仪器；1975年5月发射了SAS−3，携带了X射线探测器。荷兰－英国－美国的红外天文卫星于1983年发射，在它11个月的有效生命中汇集了一幅高灵敏度和完整的太空红外图。由来自这些和后来发射的卫星的数据，天文学家们在短短的几十年里已经大大扩展了这一门科学的视野，并且加强了它跟主流物理学的联系。

异常天体的发现

我们已经看到，在20世纪前半叶，天文学的范围如何被扩大了，从复杂的亚原子过程直到涉及广义相对论的宇宙学模型。同时，人们越来越认识到，太空中的物理条件比任何一个实验室所能达到的更为极端，因而我们不能把似乎是属于科学幻想的天体和过程排除在外。

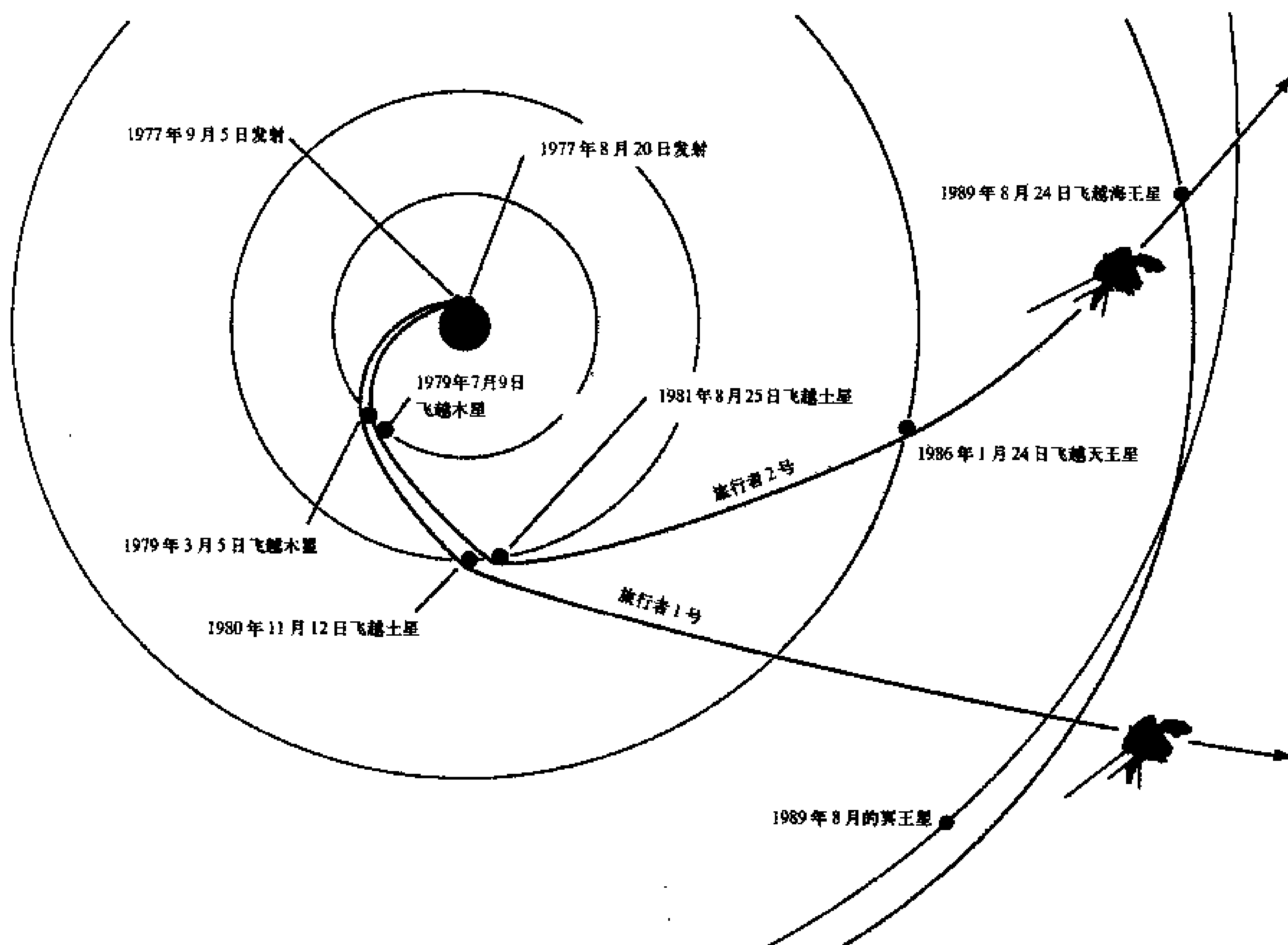
太阳系空间探索

1959年前苏联空间飞行器月球3号首次传回了月球背面的图像，最令人惊讶的发现是，月球背面缺少大型的深色玄武岩海，而在月球冲着地球的一面却以此为特征。从那一刻开始，对太阳系的直接探索开始发展起来，除冥王星之外，飞行器与所有行星也包括它们的卫星，还有彗星和流星，进行了近距离接触。这些探索任务传回了关于引力和磁场的技术数据，也传回了许多现在人们已经熟悉的揭示新世界细节的"太空明信片"。木卫一上有活动的含硫磺的火山，天卫五上极度支离破碎的老年地貌和带着或明或暗的悬崖和山脊的年轻复杂地形令人着迷地结合在一起，这些是由在月球之外开始长距离旅行的无人探测仪器揭示的许多奇异小世界中的几个。

首次对月球表面的高清晰度近距观测于1964年7月由美国月球探测器徘徊者7号完成，它传回了数千幅电视图像，为5年之后的阿波罗登月作准备。美国宇航员带回了数百块矿物标本，帮助确定月球起源的年龄和复杂的化学成分。

1970年金星7号成为首次从另一颗行星表面传回信号的飞行器，首批金星地形的真实图像由前苏联的飞行器在1975年给出。同时美国的水手系列飞行器探明了水星、金星和火星的表面。1975年发射的海盗号火星探测器，给出了火星上的宏伟外观，有极妙的火山喷口和巨大的水手谷（Valles Marineris）峡谷系统。美国的旅行者号传回了木星气候令人瞩目的细节和土星（1979—1981年）、天王星（1986年）和海王星（1989年）的光环和卫星系统。

这些探测重新唤醒了对行星的研究，而在20世纪初期与更迷人的宇宙学和天体物理学的竞争中，对行星的研究已处在相对不利的局面。



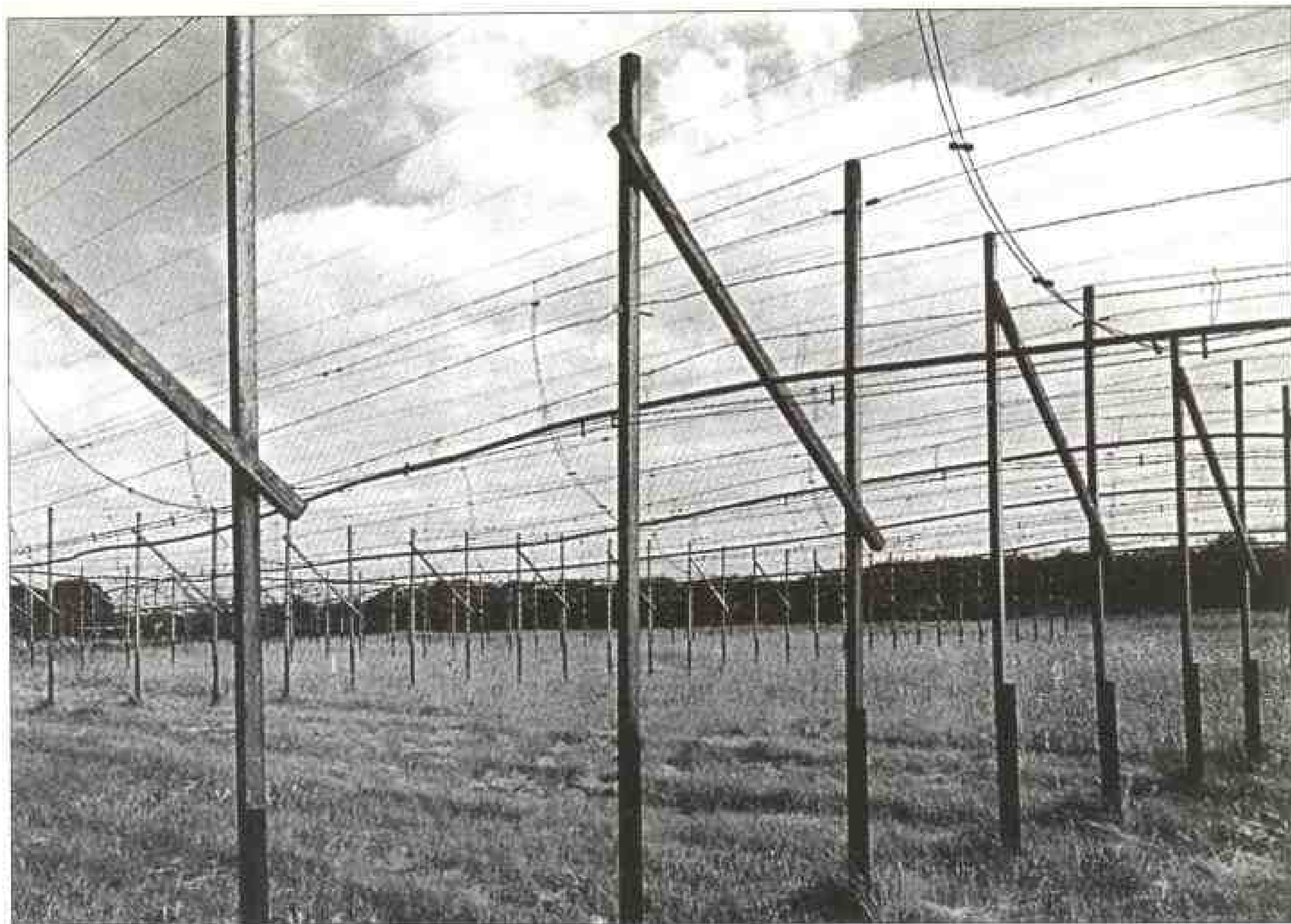
但是就是最有远见的天文学家的本能也是保守的。18世纪的思索者们已经讨论了这样一类恒星的特征，它们的密度如此之大，以致光线受万有引力的牵引而不能离开恒星（见本书第224页）。而根据爱因斯坦的广义相对论，在恒星演化到末期时，假如恒星质量足够大，它向内的万有引力压倒了向外的斥力，在理论上就能产生这种奇异的天体（今天叫做“黑洞”）。1935年钱德拉塞卡在皇家学会的一次会议上正确地表明，白矮星再多半个太阳质量的话，就不能抵挡巨大的引力而要发生进一步坍缩。但是爱丁顿爵士——尽管他本人就是一位第一流的相对论倡导者，对这位年轻人的观点进行了嘲笑，认为不能接受自然以如此异常的方式行事。不到十年，奥本海墨（J. Robert Oppenheimer，1904－1967年）和斯尼德（Hartland Snyder，1913 － 1962年）把注意力集中到引力坍缩过程上，指出描述坍缩的动力学过程需要用到广义相对论，这样他们为被叫做“黑洞物理学”的学问打下了基础。

在20世纪60年代，观测者用射电望远镜发现了两种存在于天文学家的宇宙中的近乎难以置信的天体类型。1962年，月亮有三次机会从赖尔在第三次剑桥观测中发现的射电源中的一个前面经过，对这一“隐藏”的观测，使得新南威尔士帕克斯射电望远镜天文台的观测者们能够表明这个天体是个双射电源，他们证认出其中一个部分是一个蓝色的像恒星一样的13等天体。这个发现促动了荷兰裔天文学家施米特（Maarten Schmidt，1929－）使用帕洛玛山200英寸反射镜来研究这颗恒星的光谱。

它的光谱确实奇特：叠加在连续谱上的明亮发射线似乎是来自一种未知的元素，但施米特最后认出这是一系列氢的谱线，早在1885年瑞士物理学家巴尔末（Johann Balmer）就已经研究过这些谱线。但是这些谱线有异常大的红移，这意味着这个类恒星的天体离银河系非常遥远——假如用通常的方式来解释红移的话。

围绕这个“类星射电源”或“类星体”的本质发生了尖锐的争论，因为如果它确实如它的巨大红移所指示的那么遥远，那么它就需要一个巨大的本身亮度。随着时间的推移，红移越来越大的类星体被发现，其中一些的红移显示出它们的退行速度达到了90%光速，并处在几十亿光年之外。类星体在这样远的距离上还能被看见，它们的亮度必定得比整个星系的亮度还亮100万倍。然而它们也必定是比较小的，因为它们的亮度在数小时内变化一倍。只有一个超大质量的黑洞才能提供一线希望来为这种过程给出物理的解释。因此，一些天文学家拒绝相信类星体的红移已经得到了解释并不奇怪。

四年之后发现了第二种异常类型天体。一位剑桥的射电天文学家休伊什（Antony Hewish，1924－）和他的学生贝尔（Jocelyn Bell）建造了一个粗糙但有效的射电望远镜，由金属线和柱子组成，排列在四英亩大的地面上。他们的研究包括行星际等离子体（由可以自由运动的离子和电子构成的物质）对来自遥远射电源辐射波的影响。他们在研究的过程中，偶然发现了一种微弱的射电源，后来弄清楚它们发出的是一种周期只有1秒左右的等间距规则脉冲。这样一种快速发射似乎该在地球上才能产生，也许来自一个军事装置——或者，如果它不是来自地球，而是来自宇宙中某处的智慧生命“小绿人”——但是最终弄明白了它是



用柱子和金属线自制的天线，占地超过4英亩，在剑桥被用来发现第一颗脉冲星。剑桥早期的射电望远镜采用多种形式，倾向于巡天观测而不是用于单个天体的研究。所以它们不必如乔德里尔班克射电望远镜（见330—331页）那样完全可动，以便能跟踪一个天体。

天然的天体。

这颗“脉冲射电星”或者叫“脉冲星”被证明是旋转的中子星，这是一种小的但是高密度的恒星类型，早在1934年，查德威克发现中子之后不久，兹维基和巴德就预言过中子星的存在（见289页）。它一秒钟旋转一次，每旋转一次，它的辐射束就扫过地球一次，很像灯塔的光束扫过周围的水面。从那以后，已经发现了几百颗脉冲星，全都以惊人的速度旋转着，在蟹状星云的中心有一颗脉冲星的周期只有三十分之一秒。

脉冲星被证明是有重大意义的。这些中子星只能从较小密度的恒星坍缩而成，它们证明了这样的坍缩确实发生了。在中子星内部，中子之间的作用力抵抗着导向进一步引力坍缩的巨大压力，但是计算表明，一颗质量只需再大数倍的恒星，中子之间的作用力将不足以抵抗引力坍缩，恒星会因此变成一个黑洞。

剧变的宇宙

20世纪60年代和70年代的发现，使得天文学家对天文事件的步调产生了完全不同的看法。天体演化以一直庄重的步伐前进的观念，让位给了宇宙中充满突发事件的想法。从脉冲星的几分之一秒量级的振荡到类星体比较快的光变，宇宙事件发生的速度远远快于像太阳这样的恒星所经历的上百亿年的演化。天文学家观测到了正在形成中的恒星，其中的一些年龄只有几万年，到20世纪80年代，天文学家们认识到超新星核最后的猛烈坍缩只能用毫秒来计算。就是令人难以置信的宇宙大爆炸，包括氢和氦的形成，也只在3分钟里完成。

天体物理学家开始认识到许多可见部分以外的意外辐射，起因于非热过程。

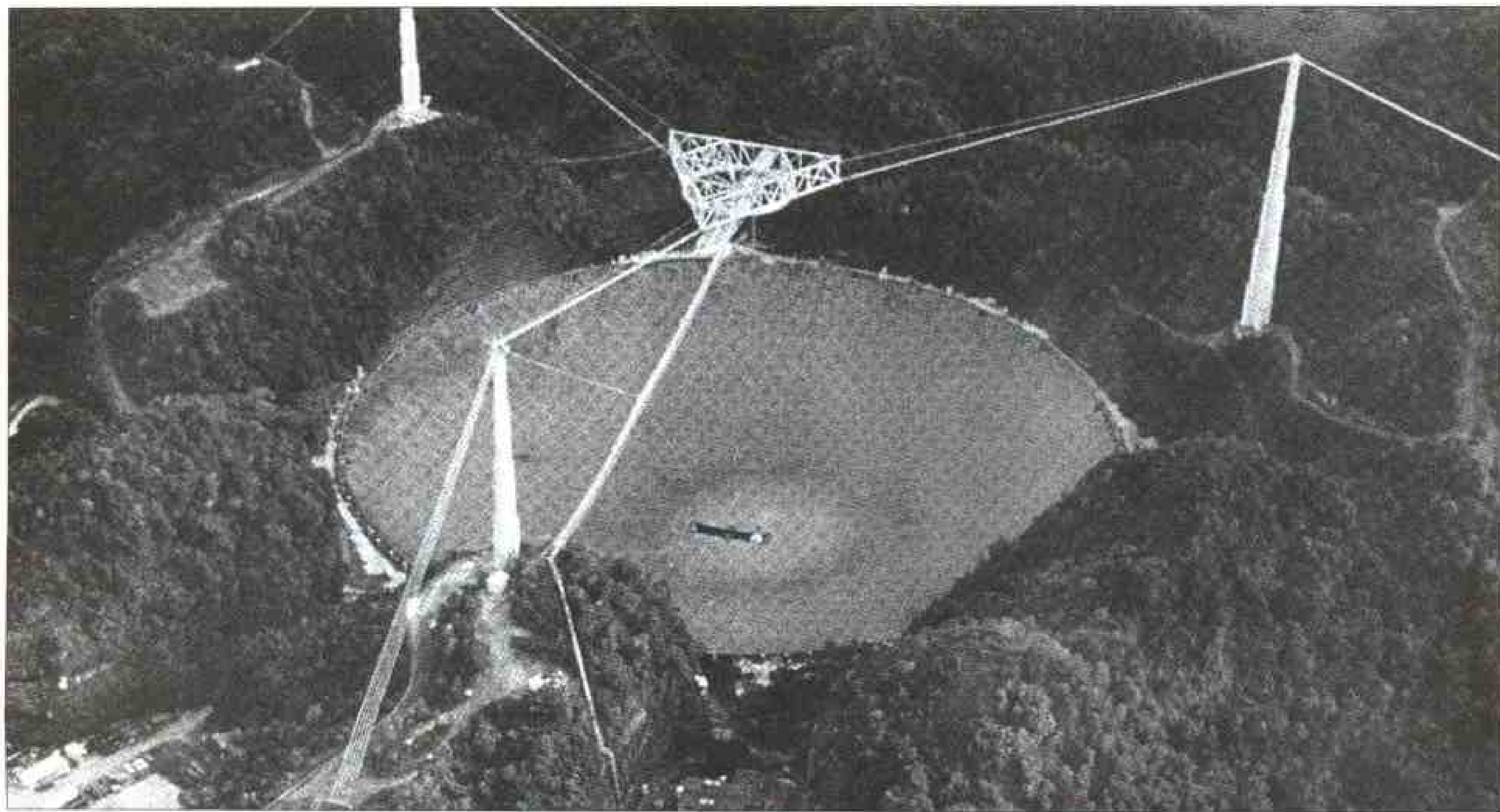
这就是说，辐射与热原子的随机运动不相干，而是与高度有序的运动譬如电子在磁场中的运动有关。二三十年来，天文学家乐于说起他们的新观念"剧变的宇宙"，但是这个叫法逐渐也不通行了，而"高能天文学"这一表述获得了越来越多的青睐。

天文学家对如"最初三分钟"的创生或爆缩－超新星爆炸之类剧烈、快速事情变得熟悉起来了，与此同时，他们发现这些不同的现象在对元素如何产生的解释上联系起来了。在大爆炸最初几分钟的高度非平衡的相互作用中，纯能量的光子转变成了质子和电子，它们不久就结合成氢和氦，但是由于缺少一种原子量为5的稳定同位素，因而阻碍了形成更重的元素。与此不同，在恒星内核的慢平衡过程中，有可能形成碳、氧和一些高位的元素，而在超新星大坍缩中，许多更重的元素形成并被吹散到太空中。这些宇宙碎片成了下一代恒星的材料。这一幅元素形成理论图像的大部分由G.伯比奇（Geoffrey Burbidge，1925－）、M.伯比奇（Margaret Burbidge，1919－）、霍伊勒（Fred Hoyle）和福勒（William Fowler，1911－1995），以及卡梅隆（A.G.W. Cameron，1925－）独立地构想出来。这是20世纪下半叶天文学意义最为深远的洞察之一，它已经为天体化学组成演化的观测研究提供了坚实的基础，并且引人注目地证实了我们的宇宙有一个缓慢演变的漫长历史。

结 论

这短短的最后一章只是提到了一些仪器、观测技术和一些20世纪下半叶发展

位于波多黎各的阿雷西博天文台，那里一架碟面直径为305米（1000英尺）的射电望远镜建造在一个天然山谷里。1974年罗素·A·赫尔斯和约瑟夫·H·泰勒就是用这架射电望远镜发现的第一例脉冲双星。许多脉冲星是双星（两颗恒星被引力束缚在一起，其中一颗是射电脉冲星），而其中大约半数脉冲星每秒自转100次或更多。在赫尔斯和泰勒发现的脉冲星中，两颗中子星以略短于8个小时的周期在非常扁的轨道上互相绕转。从这两颗恒星得到的数据和它们的行为，被用来精确地检验了广义相对论。



起来的理论，还提供了一些已经在当代天文学家的宇宙中占据了一席之地的奇异天体的样本。

把现代天文学家和普通公众分隔开来的鸿沟并不新鲜。那些在天文学前沿的、拥有理解天体所需知识的，总是一些从社会其他部分分离出来的精英，这种深奥的知识则以大大淡化了的形式散布给社会的其他部分。这样的情形毫无疑问也发生在史前时期，当然也发生在中国和像玛雅这样的中美洲文化中。在中世纪，带着本轮、均轮和等分点的托勒密《至大论》是一本只对很少一些人打开的书。哥白尼的《天体运行论》同样是一本难以理解的书，而开普勒的成就，就是像伽利略和笛卡儿这样的聪明人才也未能赏识。牛顿《原理》的发扬光大只留给了少数有才华的数学家们。到爱因斯坦，这条鸿沟变得更宽了，1920年“大辩论”（见本书第309页）的组织者阿伯特（C.G.Abbot）拒绝相对论作为一个可能的话题，他说：“我向上帝祈祷，科学的进步会把相对论送到第四维空间之外的某个地方，从此它就永远不会从那里回来折磨我们了。”而从那以后，天文学学生面临的技术上和概念上的障碍已经稳步增长到令人畏惧的地步。

也许历史上在学者的宇宙和普通人的宇宙之间，只曾有过一次真正的和谐。在拉丁中世纪，上帝带着他的天使和被他恩宠的灵魂住在天堂，人类则住在位于宇宙中心的地上，这不是一个特别荣耀的位置，而只是一个符合人类伦理价值的地方。而即使是在那时，天文学家的本轮也在四艺（Faculties of Arts）中造成混乱。在哥白尼的改革之后不久，英国诗人唐纳（John Donne，1573－1631年）写道：

> 新哲学把一切都带进了疑问，
> 火元素已彻底退场；
> 太阳失去了往日的尊位，
> 地球也不知该身处何方。
> 没有人能指点该去何处寻找……
> 一切都支离破碎，一切都不再一致；
> 一切都只为需要，一切都只缘日地关系的颠倒。

在这本书的开始，我们讨论了柏拉图对他同时代人的挑战，邀请他们回答宇宙是否是可理解的这个问题。今天，多少个世纪之后，答案或许是“是可以理解的，但仅仅是个开始。”

（钮卫星译）

大事年表

公元前3500年 新格兰奇走廊墓园建造
3000 巨石阵一期建造
埃及的宗教历法
埃及的行政历法
2500
2000 古巴比伦金星记录（位值数字系统）
1500
1000 巴比伦星表获得确定形式

系统的巴比伦记录 公元前700
希腊宇宙学 600
巴比伦人确认默冬章 500
希腊人认识到大地球形
柏拉图提出行星问题 400
欧多克斯，天球模型
亚里士多德的世界图景 300
阿利斯塔克，日月距离
埃拉托色尼，地球的大小
阿波罗尼乌斯，偏心圆、本轮和均轮 200
基于巴比伦天象记录的希腊行星模型，希帕恰斯太阳和月亮的运动模型、星表、岁差 公元前100年
托勒密，《至大论》，《行星假说》，《四书》 公元100年
200
300

基督教世界的中世纪

卡尔西丢斯
马丁内斯·卡佩拉 400
马克罗比乌斯
博埃修斯 500
600

伊斯兰的中世纪

632 穆罕默德去世

比德 700
800

希腊经典的翻译 巴格达 智慧宫
阿尔·巴蒂尼
阿尔·苏菲 900
阿尔·哈桑 1000
阿尔·扎卡里

星盘传至西方

1120–1125 开罗天文台 1100
阿弗洛伊

从希腊文和阿拉伯文翻译天文学著作

阿尔·比鲁吉
1259 阿尔·图西马拉盖天文台

［英］萨克罗博斯科：球体 1200
无名氏：行星理论

1300
阿尔·沙提尔
1420 乌鲁·贝格建造的撒马尔罕天文台

印刷术发明 1400
1474 普尔巴赫《新行星理论》
1496 《至大论》摘要

1570–1580 伊斯坦布尔天文台

1543 哥白尼《天体运行论》 1500

1570

1572 第谷新星

1577 第谷发现彗星是天体

1576—1597年 第谷·布拉赫在汶岛(Hven)建立天文台

1580

1590

1596 开普勒《宇宙神秘》

1600

1602 第谷星表发表

1604 开普勒新星

1609 开普勒《新天文学》，发表第一、第二定律。伽利略首次望远镜观测。

1610

1610 伽利略《星际使者》

1611 开普勒设计天文望远镜

1613 伽利略《关于太阳黑子的通信》

1619 开普勒第三定律

1620

1627 《鲁道夫星表》

1630

1632 伽利略《两大世界体系的对话》

1640

1640 盖斯科因的测微计

1644 笛卡儿《哲学原理》

1650

1659 惠更斯解释土星光环

1660

1663 格里高利设计反射镜

1665 皇家学会《哲学会报》开始出版

1667 巴黎天文台建立。鲸鱼座ο变星周期确定

1670

1672 牛顿指出白光的复合性质

1675 格林威治天文台建立

1677—1678 哈雷在圣赫勒那岛

1680

1687 牛顿《原理》

1690

1690 海维留斯的星表

1695 哈雷彗星周期的确认

1700

1710

1720

1721 哈雷关于对称恒星系统的论文发表

1725 弗拉姆斯蒂德的《不列颠星表》

1728 牛顿《宇宙体系》

1729 布莱德雷关于光行差的论文

1730

1740

1750

1750 赖特《一种起源理论》

1751—1753 拉卡伊在好望角

1757 米歇尔证明大多数成对恒星为“双星”

1758 多朗德描述消色差透镜

1759 哈雷彗星回归

1760

1761 开始试验哈里森的H4天文钟。金星凌日被广泛观测。

1767 《航海历书》创刊。金星凌日被广泛观测。

1780

1781 梅西叶最后的星云星表。威廉·赫歇尔发现天王星。

1783 古德里克（和皮格特）提出大陵五是食双星。

1785 威廉·赫歇尔的银河系截面图 1783—1802 威廉·赫歇尔扫描星云

1789 威廉·赫歇尔40英尺反射镜完成

1790

1796 拉普拉斯《宇宙体系论》

1799 拉普拉斯《天体力学》第一卷

1800

1800 《每月通讯》创刊

1801 皮亚齐发现谷神星

1803 威廉·赫歇尔证实双星的存在

1810

1814—1815 夫琅和费绘制太阳光谱图

1818 贝塞尔《基础天文学》

1820

1820 皇家天文学会建立

1823 《天文通报》创刊

1824 9.5英寸多尔帕特折射镜安装

1830

1834—1838 约翰·赫歇尔在好望角

1837 斯特鲁维公布织女星视差

1838 贝塞尔公布天鹅61视差

1839 普尔科沃天文台建立，15英寸折射镜

1840

1842 日食期间日冕和日珥的观测

1843 施瓦布发表太阳黑子周期

1844 贝塞尔证明天狼星和南河三有不可见的伴星。

1845 帕森城的巨型反射望远镜完成。星云的旋涡结构被认识。首次太阳银版照相。

1846 设想中的猎户星云分解。海王星（和卫星）被发现

1847 哈佛15英寸折射望远镜完成。斯特鲁维的银河系分层模型

1849 古尔德《天文学报》创刊

1850

1852 萨拜因公布太阳黑子与磁暴之间的联系

1856 波格森提出的星等定标发表。首批银基玻璃反射镜

1857 克拉克·麦克斯韦指出土星光环由物质微粒构成。

1858 德拉鲁用珂珞酊湿片法拍摄太阳黑子。

1859 坦普尔发现围绕昴宿五的真星云状物质。本生和基尔霍夫在实验室里把光谱线和元素联系起来。《波恩星表》开始出版

1860

1861－1862 基尔霍夫带有已证认元素的太阳光谱图

1862 昂斯特洛姆指出太阳气层中存在氢。克拉克观测天狼星伴星。

1863 德国天文学会成立。

1864 多纳提用分光镜观测彗星的光。哈京斯指出一种由气体组成的星云。

1866 斯契亚巴勒里把八月流星雨跟彗星联系起来

1868 塞奇描述了四种恒星光谱型

1870

1870 杨在日食期间观测到太阳反变层

1872 德雷珀拍摄织女星光谱

1876 干明胶底片在照相中使用

1877 霍尔发现火星的两颗卫星

1880

1882 吉尔的彗星照片上包含大量的恒星

1885 仙女星云S新星怂恿对“岛宇宙”的反对

1887 皮克林开始分光双星研究。《照相天图》计划启动。

1890

1890 洛克耶的《流星假说》

1897 叶凯士天文台40英寸折射望远镜完成。

1900

1900 《天文年报》创刊，发表有1899的文献

1904 国际太阳研究协作联合会建立

1905 赫兹普龙猜想巨星的存在

1906 卡普坦的《选区计划》

1908 威尔逊山天文台60英寸反射望远镜完成

1910

1912 勒维特小麦哲伦云中造父变星的周光关系

1913 罗素给出第一张场星（不是星团的成员星）的赫罗图

1914 斯里弗公布旋涡星云的大视向速度。沙普利的脉动恒星理论。亚当斯和赫尔斯朱特建立分光视差法。

1916 范马宁宣称M101自转的证据

1917 威尔逊山天文台100英寸反射望远镜完成

1918 沙普利提出“大银河系”。亨利·德雷珀分光星表开始出版。

1919 国际天文联合会建立

1920

1920 沙普利和柯蒂斯之间的“大辩论”

1923 哈勃发现仙女星云中的造父变星

1925 哈勃证明仙女星云是独立的星系。佩恩的《恒星大气》出版

1926 爱丁顿的《恒星的内部结构》出版

1927 奥尔特分析恒星运动，研究银河系结构

1929 哈勃给出"红移定律"，指出星系的一致退行

1930

1930 特伦普勒证实银盘星际尘埃的存在。发现冥王星。

1931 钱德拉塞卡研究白矮星结构

1932 央斯基建造天线，测到来自银河的无线电波

1934 巴德和兹维基发表中子星理论，指出新星分成两类。

早期射电天文学

1937 雷伯在高地建造9米可动碟面天线

1939 第二次世界大战爆发导致雷达的发展大大加快

1939 贝蒂关于恒星能源的核能理论的细节

1940

1942 测到来自太阳的无线电波

1944 巴德公布星族的发现

1945 第二次世界大战结束，雷达设备和人员转向科学研究工作

1946 V2火箭进行太阳紫外观测

早期空间研究

1948 美国帕洛玛山天文台48英寸(1.25米)施米特望远镜完成。美国帕洛玛山200英寸望远镜完成。

1948 V2火箭观测太阳X射线；早期高空探测火箭引入。

1949 首次射电源的光学对应体证认

1950

1952 巴德公布距离定标修正

1950年以后的地基光学望远镜

1950年以后的射电天文学

1951 21厘米发射线的测量

1952 天鹅座A的光学证认

1955

1957 英国班克250英尺（全）可动碟面射电望远镜

1959 美国哈密尔顿山120英寸望远镜

1960

1961 澳大利亚帕克斯64米可动碟面天线

1963 波多黎各阿雷西博天然山谷里的305米碟面天线。第一个类星体证认。

1964 英国剑桥一英里射电望远镜。测得微波背景辐射。

1965

1965 英国班克／马尔温（Malvern）甚长基线干涉，127公里长基线

1967 加拿大甚长基线干涉，3074公里长基线

1968 第一例脉冲星发现的公布

1970

1970 荷兰威斯特博克3公里射电望远镜

1972 英国剑桥5公里射电望远镜。（前联邦德国）埃菲尔斯伯格100米可动碟面天线。

1973 美国基特峰3.8米望远镜。澳大利亚赛丁泉1.24米英国施米特望远镜。

1975

1975 美国索克罗首次用甚大天线阵观测。

1975 澳大利亚赛丁泉，英澳3.9米望远镜。

1976 智利托洛洛山美国4米望远镜。前苏联帕楚科夫山6米望远镜。

1977 智利拉西拉欧洲南方天文台3.6米望远镜

1978 夏威夷莫纳克亚欧洲3.8米红外望远镜

1979 夏威夷莫纳克亚加拿大－法国－夏威夷3.6米望远镜。夏威夷莫纳克亚美国国家航空航天局红外望远镜。美国霍普金斯山多镜面望远镜。

1980

1980 甚大天线阵进入全面实用阶段

1984 西班牙卡拉阿托天文台3.5米望远镜

1985

1986 夏威夷莫纳克亚詹姆斯·麦克斯韦望远镜，15米毫米和亚毫米波碟面天线

1987 加纳甲群岛英国4.2米望远镜

1989 智利拉西拉瑞典－欧洲南方天文台15米毫米和亚毫米波碟面天线

1989 智利拉西拉欧洲南方天文台3.5米新技术望远镜

1990

1990 夏威夷莫纳克亚美国加州理工学院亚毫米波天文台10.4米亚毫米波碟面天线。

1991 夏威夷莫纳克亚美国下一代望远镜“10米凯克Ⅰ”(9.8米)

1993 美国甚长基线阵的甚长基线干涉，基线长度达8000公里。

VLBI：甚长基线干涉。 ESA：欧洲空间局。

1950年以后的空间研究

1955

1957 前苏联首次发射人造卫星

1959 前苏联月球3号首次传回月球背面图像

1960

1962 美国早期空间探测火箭观测恒星X射线

1964 美国徘徊者7号传回月球表面图像

1965

1968 美国发射轨道天文台OAO－2建成

1969 人类首次登月

1970

1970 前苏联金星7号从金星传回信号。美国小天文卫星SAS-1发射。

1972 欧洲空间研究组织紫外卫星TD－1发射。美国轨道天文台OAO－3（哥白尼号）发射。美国小天文卫星SAS－2发射。

1975

1974 美国和荷兰发射天文卫星荷兰号。美国水手10号拍摄水星、金星。

1975 前苏联金星9号拍摄金星表面。美国小天文卫星SAS－3发射。欧洲空间局γ射线卫星Cos－B发射。

1976 美国海盗号探测器拍摄火星表面

1977 美国旅行者1号和2号发射

1978 欧洲空间局、英国、美国发射国际紫外探测器。美国发射高能天体物理天文台 HEAO-2（爱因斯坦天文台）。

1979 旅行者1号和2号访问木星

1980

1980 旅行者1号访问土星

1981 旅行者2号访问土星

1983 荷兰、英国、美国发射红外天文卫星。欧洲空间局发射X射线卫星 EXOSAT。

1985

1986 旅行者2号访问天王星。欧洲空间局的乔托号和其他太空飞行器拦截观测哈雷彗星。

1989 旅行者2号访问海王星。美国发射探测木星的伽利略号探测器。欧洲空间局发射伊巴谷天体测量卫星。

1990

1990 美国哈勃太空望远镜发射。德国、英国和美国发射 ROSAT 天文卫星（X射线卫星）

1991 美国康普顿γ射线天文台发射

1992 美国极紫外探测器 EUVE 发射

1993 哈勃太空望远镜光路修正。日本发射 ASCA（宇宙学和天体物理学高新卫星）X－射线卫星。

1995 伽利略号探测器访问木星。欧洲空间局发射太阳和太阳风层探测器。欧洲空间局发射红外空间天文台。

（钮卫星译）

专业术语表

A

aberration of light 光行差
absolute brightness 绝对亮度
absolute magnitude 绝对星等
absorption band (line) 吸收谱带
achromatic lens 消色差透镜
active optics 主动光学
alidade 照准仪
altazimuth 地平经纬仪
altitude 地平纬度，地平高度
angular velocity 角速度
annual parallax 周年视差
aphelion 远日点
apogee 远地点
apparent brightness 视亮度
apparent magnitude 视星等
arc minute 弧分（1度的60分之一。1′）
arc second 弧秒（1″）
armillary sphere 浑仪
asteroid 小行星
astrolabe 星盘，等高仪
astronomical unit 天文单位（日地距离）
astrophysics 天体物理学
atmospheric refraction 大气折射
azimuth 方位角、地平经度

B

backstaff 后杆仪（航海家用来测量太阳高度的仪器）
Big Bang 宇宙大爆炸
binary star 双星
black hole 黑洞
brightness 亮度

C

CCD 电荷耦合器件
Cepheid 造父变星
charge-coupled device 电荷耦合器件
chromatic aberration 色差
chromosphere 色球
climate 气候（带）
collapse, gravitational 引力坍缩
collodion process 珂珞酊（火棉胶）光学成像效果
colour excess (CE) 色余
colour index (CI) 色指数
complement 余角
concave 凹透镜
concentric spheres 同心球
conjunction 合
convex 凸透镜
corona 日冕
cosmos 宇宙
cotangent 余切
crepe ring C环（土星内环之一）
cross-staff 十字照准仪、十字仪
culmination 中天

D

decan 黄道十度分度（古埃及旬星系统）
declination 赤纬
deferent 均轮
dip 磁倾角
discrete radio source 分立射电源
divided-lens micrometer 分透镜测微计
Doppler Effect 多普勒效应
double star 双星（即binary star）
doublet lens 双合透镜
dwarf star 矮星

E

eccentric circle 偏心圆
eccentricity 偏心率
eclipsing binary 食双星
ecliptic 黄道
electromagnetic radiation 电磁辐射
electron 电子
elementary 基本空间（在亚里士多德宇宙学中之月下空间，其中充满土、水、气、火四元素）
elongation 距角（行星与日对地之夹角）
emission band (line) 发射带（线）
ephemeris 历表
epicycle 本轮

equant point 对点（托勒密在几何模型中所引入的）
equator, celestial 天赤道
equatorial 赤道式的
equinox 春分点或秋分点
extragalactic nebula 河外星云

F

faculae 光斑
fixed star 恒星
focal length 焦距
focus 焦点
focus, empty 空焦点（行星轨道中未被太阳占据的那个焦点）
Fraunhofer lines 夫琅和费谱线
Fraunhofer spectrum 夫琅和费光谱
fundamental particles 基本粒子

G

galaxy 星系
gamma rays γ射线
Giant Branch 巨星支
globular cluster 球状星团
graduated 有刻度的
great circle 大圆

H

H-R diagram 赫罗图
heliacal rising 偕日升、晨出
heliacal setting 偕日落、夕没
heliometer 量日仪
Hertzsprung-Russell diagram 赫兹普隆-罗素图（赫罗图）
hippopede 行星轨迹（同心球模型所产生的）
hour circle 时圈
HST 哈勃空间望远镜

I

impetus 冲力说
inclination 倾角
inequality 差（月球及行星轨道与简单模型之间的）
inertia 惯性
infrared radiation 红外辐射
intercalary 闰
intrinsic brightness 本征亮度
inverse-square law 平方反比律
ionization 电离

K

kinetic energy 动能

L

latitude 纬度；黄纬
light year 光年
light-gathering power 聚光本领
longitude 经度；黄经
luminosity 光度

M

macrocosm 大宇宙（与人体小宇宙对应）
Magellanic Clouds 麦哲伦云
magnification 放大倍数
magnitude 星等
Main Sequence 主星序
mean 平均值
mechanical philosophy 机械论哲学
meridian 子午线
meteor 流星
meteorite 陨星、陨石
Meteoritic Hypothesis （太阳系起源的）陨星假说
Metonic cycle 默冬章（太阴周）
microcosm 小宇宙（人体的）
micrometer 测微计
microwave background radiation(MBR) 微波背景辐射
mural quadrant 墙象限仪
muwaqqit 穆瓦奇特（清真寺里的授时者）

N

nebula 星云
neutron 中子
neutron star 中子星
Next Generation Telescope 下一代望远镜

NGT 下一代望远镜
nocturnal 夜间定时仪
nova 新星
nutation 章动

O

objective 物镜（亦即 lens 或 object glass）
obliquity of the ecliptic 黄赤交角
Olbers's Paradox 奥伯斯佯谬（即光度佯谬）
open cluster 疏散星团
opposition 冲

P

parabola 抛物线
parallax 视差
parameter 参数、参量
parsec 秒差距
perigee 近地点
perihelion 近日点
period-luminosity relationship 周光关系
periodic variation 周期变化
perturbations 摄动、微扰
photographic magnitude 照相星等
photosphere 光球
place-value 位值
planet 行星
planetary nebula 行星状星云
polar circles 极圈
precession 岁差；进动
projection 射影、投射
prominences 日珥

Q

qibla 穆斯林朝觐的方向（即麦加殿堂所在方向），亦作"Kibla"
quadrant 象限仪
quadrature 方照；上、下弦
quadrivium 四艺（中世纪四种与数学有关的学问：算术、音乐、几何、天文）
quantum mechanics, quantum theory 量子力学、量子论
quasar 类星体
quintessence 第五元素（亚里士多德宇宙论中组成天体的元素）

R

radial velocity 视向速度
radio source 射电源
radio star 射电星
radius vector 矢径
redshift 红移
reduction 归算
reflector 反射望远镜
refractor 折射望远镜
retrogression 逆行
right ascension 赤经
RR Lyrae star 天琴RR型星

S

secular variation 长期变化
selective absorption 选择性吸收
sextant 纪限仪；六分仪
sidereal time (ST) 恒星时
sine 正弦
solar apex 太阳向点
solstices 二至点；二至日
spectral type 光谱型
spectrograph, spectroscope 摄谱仪、分光镜
spectroheliogram 太阳分色照片
spectroscopic binary 分光双星
spectroscopic parallax 分光视差
spectrum 光谱、频谱
spherical aberration 球差
spiral nebula 旋涡星云
Steady State 稳恒态
Sublunary 月下空间
supernova 超新星
synodic month 朔望月

T

tangent 正切

transit 中天；凌日
trigon 三宫（西方星占学中黄道上分别相距120度的三个宫）
trivium 三艺（中世纪的语法、修辞、逻辑）
tropics 回归线

U

ultraviolet radiation 紫外辐射

V

variable star (VS) 变星
visual magnitude 目视星等
volvelle 日月升落潮汐仪（用于计算行星位置或演示托勒密体系）
vortex 涡旋（笛卡儿宇宙论中的）

W

white dwarf (WD) 白矮星

X

X rays X 射线

Z

zenith 天顶
zij 积尺（穆斯林的行星星历表）
Zodiac 黄道带

（关增建译，钮卫星、江晓原校）

进一步阅读书目

General reading

For a similar range of topics to that covered in the present work, see The Fontana/Elsevier History of Astronomy and Cosmology by John North (Fontana, London, and Elsevier, New York, 1995). Though minimally illustrated, this paperback is elegantly written by a leading historian of astronomy. It includes an extended bibliographical essay covering both popular and specialist writings.

One other survey of the history of astronomy, by a leading astronomer, is still of value, though somewhat dated: A History of Astronomy, by A. Pannekoek (publ. in Dutch in 1951; English transl., George Allen & Unwin, London, 1961; reprinted in paperback, Dover Publications, New York, 1990).

For accounts of the lives and work of all the major figures in history of astronomy (except those still living at the time of publication), see the Dictionary of Scientific Biography, ed. by C.C. Gillespie (16 vols, Charles Scribner's Sons, New York, 1970–80, plus later additions). In many cases the entry in the DSB is quite simply the best discussion available, and the work is available in most major libraries.

An in–depth study of the history of astronomy down to 1950 is contained in The General History of Astronomy, under the general editorship of Michael Hoskin (4 vols in 7 parts, Cambridge University press, Cambridge, 1984–, in progress); the relevant volumes and parts are listed below in the reading lists for individual chapters.

Many history of science journals contain occasional articles in history of astronomy, but the one journal dedicated to the subject is Journal for the History of Astronomy, ed. by Michael Hoskin (quarterly plus annual Archaeoastronomy supplement, Science History Publications, 16 Rutherford Road, Cambridge CB2 2HH, UK).

An anthology of interesting essays on topics ranging over the whole period of this book is The Great Copernicus Chase, and Other Adventures in Astronomical History, by Owen Gingerich (Sky Publishing Corporation, Cambridge, Mass., and Cambridge University Press, Cambridge, 1992). Another anthology, this time mainly on topics in astronomy since the invention of the telescope, is The Astronomical Scrapbook: Skywatchers, Pioneers, and Seekers in Astronomy, by Joseph Ashbrook (Sky Publishing Corporation, Cambridge, Mass., and Cambridge University Press, Cambridge, 1984).

Chapter 1: Astronomy before History

Aveni, Anthony F., Ancient Astronomies (St Rémy Press, Montreal, and Smithsonian Books, Washington DC, 1993).

Aveni, Anthony F., Empires of Time: Calendars, Clocks and Cultures (Basic Books, New York, 1989)

Aveni, Anthony F., Skywatchers of Ancient Mexico (University of Texas Press, Austin and London, 1980).

Aveni, Anthony F. (ed.), The Sky in Mayan Literature (Oxford University Press, Oxford and New York, 1992)

Aveni, Anthony F., and Gary Urton (eds), Ethnoastronomy and Archaeoastronomy in the American Tropics (New York Academy of Sciences, New York, 1982)

Burl, Aubrey, Prehistoric Astronomy and Ritual (Shire Publications, Princes Risborough, Aylesbury, HP179AJ, UK, 1983)

Hodson, F.R. (ed.), The Place of Astronomy in the Ancient World (Oxford University Press, for the British Academy, London, 1974)

Ruggles, C.L.N., Astronomy in Prehistoric Britain and Ireland (Yale University Press, New Haven, 1997)

Ruggles, C.L.N. (ed.), Archaeoastronomy in the 1990s (Group D Publications, 81 Park Road, Loughborough, LE11 2HD, UK, 1993)

The Archaeoastronomy supplement to Journal for the History of Astronomy is devoted to the subject matter of this chapter.

Chapter 2: Astronomy in Antiquity

Clagett, Marshall, Ancient Egyptian Science, vol. 2:

Calendars, Clocks, and Astronomy (American Philosophical Society, Philadelphia, 1995)

Crowe, Michael J., Theories of the Worldfrom Antiquity to the Copernican Revolution (Dover Publications, New York, 1990)

Heath, Thomas L., Greek Astronomy (Dent, London, 1932; reprinted by Dover Publications, New York, 1991)

Hodson, F.R.(ed.), The Place of Astronomy in the Ancient World (Oxford University Press, for the British Academy, London, 1974)

Neugebauer, Otto, The Exact Sciences in Antiquity (2nd edn, Yale University Press, Providence, RI, 1957; reissued by Dover Publications, New York, 1969)

Pedersen, Olaf, [and Mogens Pihl], Early Physics and Astronomy (Macdonald, London, and American Elsevier, New York, 1974; 2nd edn, Cambridge University Press, Cambridge, 1993)

Thurston, Hugh, Early Astronomy (Springer Verlag, New York, 1993)

Vander Waerden, B.L., Science Awakening II: The Birth of Astronomy (Noordhoff International, Leiden)

Van Helden, Albert, Measuring the Universe: Cosmic Dimensions from Aristarchus to Halley (University of Chicago Press, Chicago and London, 1985)

See also The General History of Astronomy, vol. 1: Antiquity to the Renaissance, Part A: Astronomy in Antiquity (Cambridge University Press, Cambridge, in preparation); and the five extended essays dealing with astronomy in Egypt, Mesopotamia and India, in vol. xv of Dictionary of Scientific Biography, ed. by C.C. Gillispie (Charles Scriber's Sons, New York, 1978)

Chapter 3: Islamic Astronomy

King, David A., Astronomy in the Service of Islam (Variorum, Aldershot, 1993)

King, David A., and George Saliba, From Deferent to Equant (New York Academy of Sciences, New York, 1987)

Saliba, George, A History of Arabic Astronomy: Planetary Theory during the Golden Age of Islam (New York University Press, New York and London, 1994)

See also The General History of Astronomy, vol. 1: Antiquity to the Renaissance. Part B: Astronomy in the Middle Ages and the Renaissance (Cambridge University Press, Cambridge, in preparation)

Chapter 4: Medieval Latin Astronomy

Crowe, Michael J., Theories of the World from Antiquity to the Copernican Revolution (Dover Publications, New York, 1990)

Gingerich, Owen, The Eye of Heaven: Ptolemy, Copernicus, Kepler (American Institute of Physics, New York, 1993)

Grant, Edward, Planets, Stars and Orbs: Medieval Cosmology, 1200–1687 (Cambridge University Press, Cambridge, 1993)

Lindberg, David C.(ed.), Science in the Middle Ages (The University of Chicago Press, Chicago and London, 1978)

Pedersen, Olaf, [and Mogens Pihl], Early physics and Astronomy (Macdonald, London, and American Elsevier, New York, 1974; 2nd edn, Cambridge University Press, Cambridge, 1993)

Rosen, Edward, Three Copernican Treatises (Columbia University Press, New York, and Oxford University Press, London, 1939; reprinted Dover Publications, New York, 1959, Octagon Books, New York, 1971)

Van Helden, Albert, Measuring the Universe: Cosmic Dimensions from Aristarchus to Halley (University of Chicago Press, Chicago and London, 1985)

Westman, Robert S.(ed.), The Copernican Achievement (University of California Press, Berkeley and Los Angeles, 1975)

See also The General History of Astronomy, vol. 1: Antiquity to the Renaissance, Part B: Astronomy in the Middle Ages and the Renaissance (Cambridge University Press, Cambridge, in preparation)

Chapter 5: From Geometry to Physics: Astronomy Transformed

Aiton, Eric J., The Vortex Theory of Planetary Motions (Macdonald, London, and American Elsevier, New York, 1972)

Caspar, Max, Kepler (2nd English edn. Dover Publications, New York, 1993)

Drake, Stillman, Discoveries and Opinions of Galileo (Doubleday, Garden City, NY, 1957)

Drake, stillman, Galileo at Work: His Scientific Biography (University of Chicago Press, Chicago and London, 1978)

Galileo, Dialogue Concerning the Two Chief World Systems, transl. by Stillman Drake (University of California Press, Berkeley and Los Angeles, 1953; rev. edn, 1967)

Galileo, Sidereus Nuncius, or The Sidereal Messenger, transl. by Albert Van Helden (University of Chicago Press, Chicago: 1989)

Jardine, Nicholas, The Birth of History and Philosophy of Science (Cambridge University Press, Cambridge, 1984)

Sharratt, Michael, Galileo, Decisive Innovator (Blackwell, Oxford, 1994; now published by Cambridge University Press)

Stephenson, Bruce, Kepler 's Physical Astronomy (Spring Verlag, New York, 1987; paperback, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1994)

Stephenson, Bruce, The Music of the Heavens: Kepler's Harmonic Astronomy (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1994)

Thoren, Victor E., The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe (Cambridge University Press, Cambridge, 1990)

Van Helden, Albert, Measuring the Universe: Cosmic Dimensions from Aristarchus to Halley (University of Chicago Press, Chicago and London, 1985)

Westfall, Richard S., Essays on the Trial of Galileo (Vatican Observatory, 1989; distributed by The University of Notre Dame Press, Notre Dame, Indiana)

Wilson, Curtis, Astronomy from Kepler to Newton: Historical Studies (Variorum, Aldershot, 1989)

See also The General History of Astronomy, vol. 2: Planetary Astronomy from the Renaissance to the Rise of Astrophysics, Part A: Tycho Brahe to Newton, ed. by R. Taton and C. Wilson (Cambridge University Press, Cambridge, 1989)

Chapter 6: Newton and Newtonianism

Armitage, Angus, Edmond Halley (Nelson, London, 1966)

Bennett, J. A., The Divided Circle: A History of Instruments for Astronomy, Navigation and Surveying (Phaidon Christie's, Oxford, 1987)

Christianson, Gale E., In the Presence of the Creator: Isaac Newton and his Times (Free Press, New York, 1984)

Coyne, G. V., M. Heller and J. Zycinski (eds), Newton and the New Direction in Science (Vatican Observatory, 1988; distributed by Libreria Editrice Vaticana, Vatican City)

Grant, Robert, History of Physical Astronomy (Henry G. Bohn, London, 1852)

Grosser, Morton, The Discovery of Neptune (Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1962)

King, Henry C., The History of the Telescope (Charles Griffin, London, 1955)

Koyré, Alexandre, Newtonian Studies (Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1965)

Ronan, Colin A., Edmond Halley: Genius in Eclipse (Doubleday, Garden City, NY, 1969; Macdonald, London, 1970)

Westfall, Richard S., Never at Rest: A Biography of Isaac Newton (Cambridge University Press, Cambridge, 1980)

See also The General History of Astronomy, vol. 2: Planetary Astronomy from the Renaissance to the Rise of Astrophysics, Part A: Tycho Brahe to Newton, and Part B: The Eighteenth and Nineteenth Centuries, ed. by R. Taton and C. Wilson (Cambridge University Press, Cambridge, 1989, 1995)

Chapter 7: The Astronomy of the Universe of Stars

Armitage, Angus, William Herschel (Thomas Nelson, London, 1962)

Buttmann, Gunther, The Shadow of the Telescope: A Biography of John Herschel (Lutterworth Press, Guildford and London, 1974)

Crowe, Michael J., Modern Theories of the Universe from Herschel to Hubble (Dover Publications, New

York, 1994)

Ferris, Timothy Coming of Age in the Milky Way (The Bodley Head, London, 1988)

Hoskin, Michael. Stellar Astronomy; Historical Studies (Science History Publications. Cambridge, 1982)

Hoskin, Michael, William Herschel and the Construction of the Heavens (Oldbourne, London, and American Elsevier, New York, 1963)

King, Henry C., The History of the Telescope (Charles Griffin, London, 1955)

Lubbock, Constance A. (ed.), The Herschel Chronicle: The Life-story of William Herschel and his Sister Caroline Herschel (Cambridge University Press, Cambridge, 1933)

Whitney, Charles A., The Discovery of Our Galaxy (Angus & Robertson, London, 1971)

See also The General History of Astronomy, vol. 3: Stellar Astronomy, Instrumentation and Institutions from the Renaissance to the Midnineteenth Century (Cambridge University Press, Cambridge in preparation)

Chapter 8: The Message of Starlight: The Rise of Astrophysics

Berendzen, Richard, Richard Hart and Daniel Seeley, Man Discovers the Galaxies (Neale Watson Academic Publications, New York, 1976)

Christianson, Gale E., Edwin Hubble: Mariner of the Nebulae (Farrar, Straus & Giroux, New York, 1995)

Clerke, Agnes C., A Popular History of Astronomy During the Nineteenth Century (Adam & Charles Black, Edinburgh and London, 1st edn 1885, 2nd edn 1887, 3rd edn 1893, 4th edn 1902)

Clerke, Agnes C., The System of the Stars (Longmans, Green, London, 1890; 2nd edn, Adam & Charles Black, London, 1905)

Crowe, Michael J., Modern Theories of the Universe from Herschel to Hubble (Dover Publications, New York, 1994)

Ferris Timothy, Coming of Age in the Milky Way (The Bodley Head, London, 1988)

Hearnshaw, J.B., The Analysis of Starlight: One Hundred and Fifty Years of Astronomical Spectroscopy (Cambridge University Press, Cambridge, 1986)

Hermann, Dieter B., The History of Astronomy from Herschel to Hertzsprung (Cambridge University Press, Cambridge, 1984)

Hubble, Edwin, The Realm of the Nebulae (Yale University Press, New Haven, Conn., 1936; reprinted by Dover Publications, New York, 1958)

Krisciunas, Kevin, Astronomical Centers of the World (Cambridge University Press, Cambridge, 1988)

Lang, Kenneth R., and Owen Gingerich (eds), A Source Book in Astronomy and Astrophysics, 1900–1975 (Harvard University Press, Cambridge, Mass., and London, 1979)

Leverington, David, A History of Astronomy from 1890 to the Present (Springer, London, 1995)

North, J.D., The Measure of the Universe: A History of Modern Cosmology (Oxford University Press, Oxford, 1965; Dover Publications, New York, 1990)

Paul, Erich Robert, The Milky Way Galaxy and Statistical Cosmology, 1890–1924(Cambridge University Press, Cambridge, 1993)

Osterbrock, Donald E., James E. Keeler: Pioneer American Astrophysicist (Cambridge University Press, Cambridge, 1984)

Osterbrock, Donald E., John R. Gustafson and W. J. Shiloh Unruh, Eye on the Sky: Lick Observatory's First Century (University of California Press, Berkeley and Los Angeles, 1988)

Smith, Robert, The Expanding Universe: Astronomy's 'Great Debate' 1900–1931(Cambridge University Press, Cambridge, 1982)

Struve, Otto, and Velta Zebergs, Astronomy of the 20th Century (Macmillan, New York and London, 1962)

See also The General History of Astronomy, vol. 4: Astrophysics and Twentieth-century Astronomy to 1950, ed. by Owen Gingerich (Cambridge University Press, Cambridge; Part A, 1984, Part B, in preparation)

Chapter 9: Astronomy's Widening Horizons

Edge, David O., and Michael J. Mulkay, Astronomy Transformed: The Emergence of Radio Astronomy in Britain (WileInterscience, New York, 1976)

Hey, J.S., The Evolution of Radio Astronomy(Elek

Science, London, 1973)

Hirsch, Richard F., Glimpsing an Invisible Universe: The Emergence of X-ray Astronomy (Cambridge University Press, Cambridge, 1983)

Lang, Kenneth R., and Owen Gingerich(eds) A Source Book in Astronomy and Astrophysics, 1900—1975(Harvard University Press, Cambridge, Mass., and London, 1979)

Lightman, Alan, and Roberta Brawer, Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists (Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1900)

Needel, Allan(ed.), The First 25 Years in Space (Smithsonian Institution Press, Washington, 1989)

Smith, R.W., The Space Telescope: A Study of NASA, Science, Technology and Politics (Cambridge University Press, Cambridge, 1989)

Sullivan, W.T.III(ed.), The Early Years of Radio Astronomy (Cambridge University Press, Cambridge, 1984)

Verschuur, Gerrit L., The Invisible Universe: The Story of Radio Astronomy (The English Universities Press, London, and SpringerVerlag, New York, 1974)

图片致谢

Every effort has been made to obtain permission to use copyright material; the publishers apologise for any errors or omissions and would welcome these being brought to their attention.

ii–iii, 18–19, Luke Dodd/Science Photo Library; iii(inset), 142, 148–149, 165, 205, from J Hevelius: Machinae Coelestis Pars Prior, 1673, by Permission of the Syndics of Cambridge University Library; 3, Werner Forman Archive/Smithsonian Institution; 5, Cambridge University Collection of Air Photographs, copyright reseved; 7, 37, 239, 241, 242, 244, 245, 254b, 262t, 288b, 289r, 291, 292, 311l, 315r, 320, 331l, b. 332, 341, 342, Private Collection; 8, 268, 313, courtesy of Professor Owen Gingerich; 10–11, Photograph by Chris Jennings; 12, South American Pictures; 13, courtesy of Professor A.F. Aveni; 15, Sachsische Landesbibliothek, Dresden; 16–17, Werner Forman Archive; 20, from A.M Stephen: Hopi Journal, Part ll, Map 4, 1936, by permission of the Syndics of Cambridge University Library; 22, 23, 27, copyright British Museum; 25, 31, (from P.Apinaus: Cosmographia), 60, 77(from Urania Ptolomaeus, 1538), 88(from Astronomicum Caesareum, fo Fll), 89(from Regiomontanus: Kalendar), 92, 109(from J A Magini: Novae Ephemerides, 1582), 121(from Johannes Kepler: Tabulae Rudolphinae), 169r, collection of Professor Owen Gingerich; 26, Yale Babylonian Collection(YBC 7289); 30, Biblioteca Estense Universitaria, Modena; 32, 177, from Francesco Barozzi: Cosmographia in Quatvor L ibros, 1585; 33, from Willian Cunningham: The Cosmographical Glasse, 1559; 42, Biblioteca Nazionale Marciana, Venezia; 45, 95, 143t, copyright Royal Observatory, Edinburgh; 46, from Peurbach: Novae Theoricae Planetarum(1460)1482, by Permission of the Syndics of the Cambridge University Library; 48, British Library, London(Oriental and India Office Collections); 49, from John Thomson: Illustrations of China and its Peoples, 1873, by permission of the Syndics of Cambriidge University Library; 51, 54, Istanbul university Library; 57, Sonia Halliday/Istanbul University Library; 59, Forschungs– und Landesbibliothek Gotha/Foto–Atelier Louis Held/Renno; 63(MS Marsh 139, fo.16v), 71(MS Canon.class.Lat.257, fo.lv). The Bodleian Library, University of Oxford; 64l, 80, 202, Museum of the History of Science, Oxford/photo by Paul Freestone; 64r Flammarion–Giraudon/Bibliotheque de l'Arsenal, Pairs; 65, The Warden and Fellows of Merton College, Oxford/photo by Thomas–photos, Oxford; 69, Royal Library, Copenhagen(MS GKS 277, 2°, fo.143r); 72Michael Holford; 73, The Wellcome Institue; 74, Biblioteca Estense, Modena(MS Lat209 f9v); 75, from Hartmann Schedel: Liber Chronicarum, 1493; 76, from Gregor Reisch; Margarita Philosophica, 1504, by permission of the Syndics of Cambridge University Library; 78, from Petrus de Alliaco: Concordancia Astronomic cum Theologia, 1409; 79t, The Metropolitan Musceum of Art. Robert Lehman Collection, 1975(1975.1.31). Copyright 1981 by the Metropolitan Museum of Art; 79b(Harl Ms4940, fo, 28)82ll(Ms Cotton Nero D vii, fo 20r), 131 (MAPS C.6.c.2), 145(C.112.c.3, from William Gilbert: De Magnete), by permission of the British Library, London; 81, from J Werner & P Apianus: 'Introductio Geographia' in Doctissimas in Verneri Annotationes, 1533; 82–3, copyright Bibliotheque Royale Albert I[er], Brussels(Ms IV111, fo 13v); 84, courtesy of the University of St Andrews, School of Physics and Astrononmy; 85t, from Petrus Apianus; Cosmographia, per Gemman Phrysum...Restituta, 1539; 85b, 143b, 174, 219, courtesy of the Whipple Museum of the History of Science, University of Cambridge; 87, Edimedia/Bibliotheque Nationale; 91l1, Bayer, Staatsbibliothek, Munich; 91r, Muzeum Okregowe w Toruniu(District Museum, Torun); 96, from Copernicus: De Revolutionibus, by permission of the Syndics of Cambride Universty Lidrary; 98, Gavno Godskonotor(Gavno Castle), Denmark; 100t, from Tycho Brahe: De Stellu Nova, 1573; 100b(from J Bayer: Uranometria, 1603), 129(from C Scheiner: Rosa Ursina, 1626–30), 187(MSHerschel W.5/5, no. 3), 188(from Herschel's Collected Works, Vol, 1, 1912), 209, 234, 237, 265(Schwabe Notebook2, 1826, p.274), 288t(RAS Photos2, No C4/13), courtesy of the Royal Astronomical Society Library; 102(from Regiomontauns: De(ometae

Magnitudine…Problemata XVI. 1531), Houghton Library, Harvard University/Photo courtesy of Professor Owen Gingerich; 103. from the Departmen of Prmts and Drawings of the Zentralbibliothek, Zurich; 104l, 105(courtesy of the Whipple Museum of the History of Science, University of Cambridge). 106, 112, from Tycho Brahe: Astronomiae Instarratae Mechanica, 1598; 107(from J Blaeu: Gran Atlas ou Cosmographic Blaviane, 1667), The Houghton Libra?, Harvard Universtiy, 110, British Library, London/Bridgeman Art Libray, London; 114, Osterrerchische Nationalbibliothek, Wien/COD.2554, fo. Iv; 115, Fondation St-Thomas, Strasbourg, 116, 200, from Jonann Kepler: Mysterium Cosmographicum, 1596; 117, from Johann Kepler Epitome Astronomiae Copenixanae, 1618-21; 120, Crawford Collection, Royal Observatory, Edinburgh/Photo courtesy of Professor Owen Gingerich; 122, 147, 171, 178-9, 181, 207, 213, National Maritime Museum, London; 127, Biblioteca Nazionale Centrale Florence; 123, courtesy of the Istitutoe Museo di Storia della Scienza, Florence/photo by Franca Principe; 124, 125, from Galileo Galilei: Starry Messenger; 126, from Galileo Galilei Dialogue on the Two Great World Systems, 1632; 128, from Galileo Galilei; Letters on Sunspots; 132, from Giambattista Riccioli: Almagestum Novum, 1651; 135, Louvre, Paris/Giraudon-Bridgeman Art Library, London; 137, from Rene Descartes: Principles of Philosophy, 1604; 141, from Thomas Digges: Perfit Description of the Caelestiall Orbes, 1576; 150t, Mary Evans Picture Library, 150b, from Christiaan Huygens: Systema Saturnium, 1659; 151, 231, courtesy of the National Portrait Gallery, London; 153, 206, 248, by permission of the President and Council of the Royal Soctety; 155, Bibliotheque Nationale/Laurois Giraudon; 159, courtesy of the Trustees of the Portsmouth Estates/photo by Jeremy Whitaker; 163, from B le B de Fontenelle: Oeuvres Diverses, Vol.1.1728, by Permission of the Syndics of Cambridge University Library; 166-7, courtesy of Roger Gaskell Rare Books; 168(from CWolf: Histoire de l' Observatoire de Paris. 1902), 168-9, 177, 257, courtesy of Observatoire de Paris; 170l, 183, 191, 218, Science Museum/Science & Society Picture Library; 170r (from W H Smyth: Speculum Hartwellianum, 1860), 208, 216, 217, 258, 262b, 263, 266, 267, 270r, 271b, 272-3, 274, 275, 277, 278, 279, 280, 281, 283, 286, 287, 295, 296, 298b, 299, 303, 305, 307, 308, 309, 311r, 315l, 319, 321, 323, 324, 325, 327, 353, courtesy of Institute of Astronomy, Cambridge (IOA); 172, from Halley: Tabula, 1705; 173, from Memoires de l' Academie Royale des Sciences, 1760; 180, the Master and Fellows, Magdalene College, Cambridge; 184, 193, courtesy of Academie des Sciences Paris; 1861, from David Gregory: Astronomiae Elementa, 1702; 186, from Christiaan Huygens: Cosmotheoros, 1698; 192, courtesy and copyright of the Astrophysikalisches Institute Potsdam; 194, L' Illustration/Sygma; 198, 199, from Johann Kepler: De Stella Nova, 1606; 212, from Robert Hooke: An Attempt to Prove the Motion of the Earth, 1674; 214, courtesy of Osservatorio Astronomico di Palermo; 222(Add MS 3965, ff. 280r, 74r). by permission of the Syndics of Cambridge University Library; 226, reproduced by permission of Durham University Library; 227, from Thomas Wright: An Original Theory of the Universe, 1750; 232(MS Gunther 36, ff. 125v), 233, 243, 252, 253, Museum of the History of Science, Oxford; 238, from a volume(c.1771)of Memoires ae l'Academie Royale des Sciences; 240, from Philosophical Transactions. vol. 75, 1785; 246, photo courtesy of William Herschel Society, Bath, with kind permission from Observatorio Astronomico de Madrid; 247, with kind permission from Observatorio Astronomico de Madrid; 249, The Royal Borough of Kensington & Chelsea Libraries and Arts Service; 250t, from G F Chambers: A Handbook of Descriptive Astronomy, 1877; 250b, from John Herschel: Results of Astronomical Observations, 1849; 251, from N.L.de Lacaille: Coelum Australe, by permission of the Syndics of Cambridge University Library; 254t, 310 (photo by Professor Owen Gingerich), courtesy of Lord Rosse; 260, Mt Wilson and Las Companas Observatories, courtesy American Institute of Physics (AIP), Emilio Segre Visual Archives; 270l (courtesy IOA), 289l(courtesy IOA), 312, 318 (courtesy IOA), Yerkes Observatory Photo; 276, The Library, Mt Stromlo Observatory of the Australian National University (courtesy of Dr David Dewhirst); 284, 285, Lowell Observatory Photograph; 294, 344-5, Mary Lea Shane

Archives of the Lick Observatory;298l,courtesy AIP. Emilio Segre Visual Archives,Margaret Russell Edmonson Collection;306,reproduced by permission of The Huntington Library, San Marino,California;328 (courtesy Professor Owen Gingerich).331r,340,The Observatories of the Carnegie Institution of Washington; 330,336,Palomar Observatory/California Institute of Technology;345,European Space Agency/Science Photo Library;349,Gary Ladd/Science Photo Library;350, Roger Ressmeyer,Starlight/science Photo Library;351, NASA;352,courtesy NRAO/AUI,photo by Bell Telephone Laboratories;356,courtesy of Bruce Elsmore; 357,NRAO/AUI/Science Photo Library;359,US Naval Reserve Laboratory;362,courtesy of the Mullard Radio Astronomy Observatory,Cambridge;363,Dr Seth Shostak/Science Photo Library;354–5,Jodrell Bank/ Science Photo Library.

(“图文致谢”所附页码为英文原版书的页码。特此说明。——编者注)

索 引

A

B

C

D

E

F

G

H

J

K

L

M.

N

O

P

Q

R

S

T

V

W

Y

Z

（关增建译，钮卫星、江晓原校）